



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ANALÝZA TEPELNÝCH ZTRÁT PASIVNÍHO MANEKÝNA VE VĚTRANÉ MÍSTNOSTI

ANALYSIS OF A HEAT LOSS OF PASSIVE MANIKIN

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ZUZANA KODAJKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MATĚJ FORMAN Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Zuzana Kodajková

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Technika prostředí (2301T024)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza tepelných ztrát pasivního manekýna ve větrané místnosti

v anglickém jazyce:

Analysis of a heat loss of passive manikin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provedení literární rešerše k danému tématu. Vytvoření výpočtového CFD modelu tepelného manekýna typu Comfortina firmy PT-Teknik podle experimentálního uspořádání na DTU v Dánsku. Vytvoření zjednodušené geometrie manekýna. Provedení CFD výpočtů a porovnání několika geometrií s uvažováním rovnoměrného tepelného toku na povrchu manekýna a lokální specifikací tepelných toků dle měření prováděných na pracovišti Energetického ústavu. Výstupem práce bude porovnání vypočtených hodnot s měřeními provedenými na DTU v Dánsku a na jejich základě vyhodnocení vlivu zjednodušení geometrie manekýna na výpočet proudění a tepelných ztrát.

Cíle diplomové práce:

Vytvoření CFD modelu

porovnání výpočtu s dostupnými měřeními

kritické zhodnocení výsledků

Seznam odborné literatury:

Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., “An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method”, Second Edition, Pearson Education Ltd,2007.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Matěj Forman, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 24.11.2009



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá problematikou tvorby počítačového modelu pre CFD modelovanie prúdenia vzduchu okolo sediacej pasívnej postavy. Súčasťou práce je analýza rýchlostného, tepelného poľa a tepelných strát okolo sediacej figuríny (modelu) a porovnanie týchto hodnôt s nameraným experimentom. Táto práca je súčasťou rozsiahleho súboru experimentov (nie sú súčasťou tejto práce), ktoré majú za úlohu vytvoriť funkčný postup pre budúce riešenie podobných úloh v priemyslovom využití.

Kľúčové slova

počítačové modelování prúdenia, tepelný manekýn, pohoda prostredia

SUMMARY

This thesis is about problematics of creating Computational Fluid Dynamics (CFD) model suited for analysis of airflow around sitting passive person. Thesis includes analysis of velocity field distribution, thermal distribution and thermal losses in the surroundings of sitting thermal dummy (computational model) and comparison of these values with experimental measurements. Thesis is a part of large experimental research (this research is not included here) focused on creating of functional method used for person-surrounding airflow analysis in future commercial use.

Key words

CFD, thermal manikin, thermal comfort

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KODAJKOVÁ, Z. *Analýza tepelných ztrát pasivního manekýna ve větrané místnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 90 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Matěj Forman, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému: Analýza tepelných strát pasívneho manekýna vo vetranej miestnosti, vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu v tejto práci.

17.05.2010

.....

Bc. Zuzana Kodajková

POĎAKOVANIE

Ďakujem týmto Ing. Matějovi Formanovi Ph.D. za jeho vedení a podporu pri tvorbe tejto práce.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PREHLÁSENIE	4
POĎAKOVANIE	5
OBSAH	6
1 TEPELNÁ BILANCIA ĽUDSKÉHO TELA	9
1.1 PRODUKCIA TEPLA	10
1.2 PRENOS TEPLA MEDZI ĽUDSKÝM TELOM A PROSTREDÍM	11
1.3 TEPELNÝ ODPOR ODEVU	16
1.4 TEPELNÁ POHODA	17
2 HODNOTENIE TEPELNÉHO STAVU PROSTREDIA	22
2.1 MODEL PMV - PPD	22
2.2 MODEL EKVIVALENTNEJ TEPLoty A KOMFORTNÝCH ZÓN	23
2.3 FIALOV MODEL	24
2.4 BERKELEY MODEL	25
3 TEPELNÝ MANEKÝN	26
3.1 HISTÓRIA TEPELNÝCH MANEKÝNOV	26
4 EXPERIMENT	29
4.1 MODEL TEPELNÉHO MANEKÝNA	29
4.2 MODEL KLIMATICKEJ KOMORY	30
4.3 SPÔSOB MERANIA	32
4.3.1 Meranie teploty	32
4.3.2 Meranie rýchlosti prúdenia	37
4.4 TEPELNÉ TOKY	41
5 POČÍTAČOVÉ MODELOVANIE POMOCOU CFD	43
5.1 POSTUP PRI RIEŠENÍ CFD ÚLOHY	44
6 MODELOVANIE EXPERIMENTU POMOCOU CFD METÓD	45
6.1 TVORBA PODKLADOVEJ GEOMETRIE	45
6.2 POČIATOČNÉ A OKRAJOVÉ PODMIENKY PRE VÝPOČET CFD ÚLOHY	48
6.3 TVORBA MATEMATICKÉHO MODELU	50
6.3.1 Voľba a nastavenie výpočtovej siete	50
6.3.2 Voľba fyzikálneho modelu	56
7 ANALÝZA A INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV	58
7.1 VYHODNOTENIE Č.1	58
7.2 VYHODNOTENIE Č.2	61
7.3 VYHODNOTENIE Č.3	67
7.4 VYHODNOTENIE Č.4	74
ZÁVER	76

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	77
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	80
ZOZNAM OBRÁZKOV	82
ZOZNAM TABULIEK	84
ZOZNAM GRAFOV	85
PRÍLOHY	86

ÚVOD

V súčasnej dobe sa neustále zvyšujú nároky na kvalitu životného a pracovného prostredia pre človeka. Pre dosiahnutie dobrého pracovného výkonu, je potrebné poznať a určiť vplyvy rôznych faktorov životného prostredia, ktoré ovplyvňujú pracovný výkon človeka. Najväčší vplyv na pocity človeka má prevažne teplotná, pohybová a vlhkosťná zložka vzduchu. Pohybovou zložkou vzduchu rozumieme prúdenie vzduchu spôsobeného rôznym princípom vetrania.

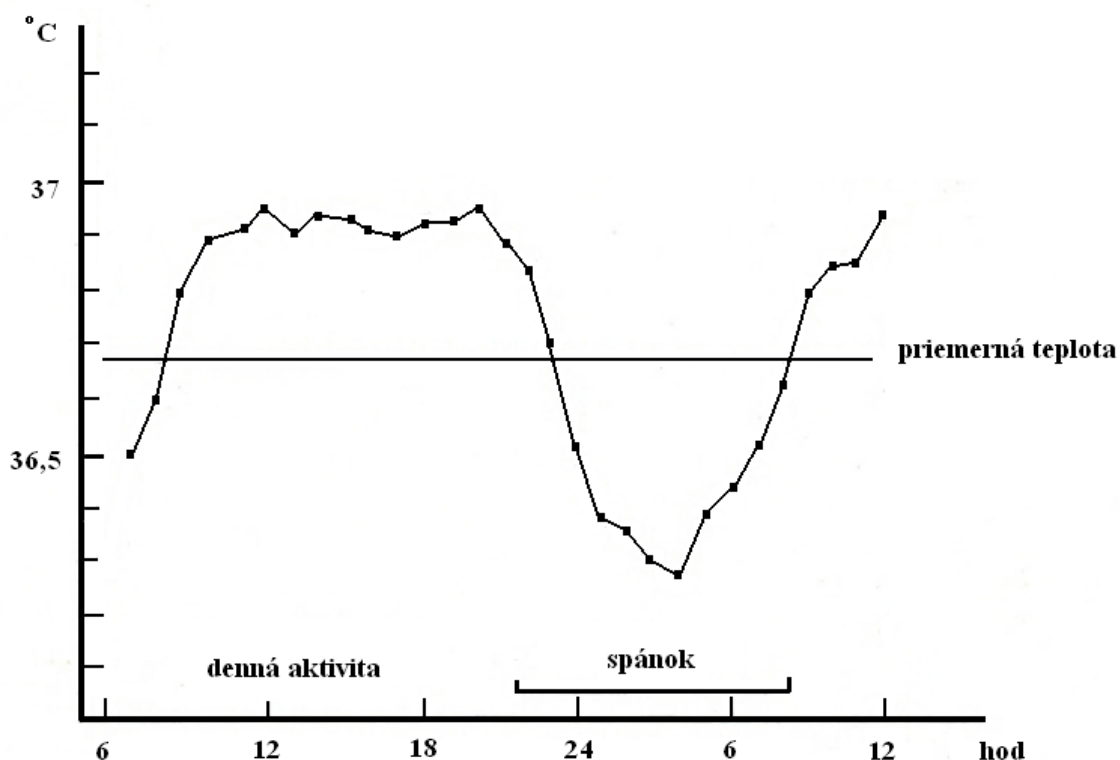
Svoje prostredie môžeme vnímať pozitívne alebo negatívne, v závislosti na vnútorných parametroch prostredia. V súčasnej dobe je snaha umelo zasahovať do vnútorných parametrov prostredia či už pracovného, obytného alebo rekreačného a vytvárať tzv. pohodu prostredia. Pri vytváraní pohody prostredia sa snažíme zaistiť také hodnoty jednotlivých zložiek, aby sa človek cítil dobre a bol schopný podávať optimálny pracovný výkon.

V tejto práci sa zaoberáme validáciou CFD zjednodušených modelov tepelného manekýna, pomocou ktorého modelujeme človeka v danom prostredí. Použitím CFD metód si môžeme vytvoriť, nasimulovať podmienky v relatívne rýchlom čase a vytvoriť si tým predstavu o možnej klíme v danom, lokalizovanom prostredí. Využitie možností CFD metód je finančne menej náročné ako prípadný experiment. Oproti experimentu nám ponúka komplexnejší súbor údajov s možnosťou prevádzania úprav a nachádzania optimálnej varianty, čo môže výrazne skrátiť čas od návrhu k finálnemu produktu.

1 TEPELNÁ BILANCIA ĽUDSKÉHO TELA

Človek sa radí do skupiny teplokrvných (homoioterných) organizmov, u ktorých, je vnútorná telesná teplota (hrudné, brušné orgány a vnútorné svalstvo) udržiavaná za normálnych okolností (zdravý organizmus) na priemernej hodnote 37°C. Táto vnútorná teplota kolíše v malom rozsahu v závislosti na tráviacich procesoch v organizme, psychickom stave, biologickom rytme a nie je ovplyvniteľná nervovou sústavou človeka.

Povrchová teplota tela (kože a podkožnej vrstvy) sa pohybuje u zdravého človeka v rozmedzí 36,5°C, kolíše počas dňa až o $\pm 0,5$ až 0,7°C tzv. diurnálny rytmus obr.1-1 a odráža vo zvýšenej miere vonkajšie vplyvy prostredia, pričom vykazuje aj miestne teplotné rozdiely – chladnejšie akrálne časti tela [1].



Obr.1-1: Kolísanie teploty tela počas dňa [1]

Telo udržiava približne stálu teplotu nezávisle na vonkajších i vnútorných podmienkach prostredníctvom krvného obehu - vlastnou termoreguláciou. Telesná termoregulácia je riadená podveskom mozgovým – hypothalamom, ktorý pôsobí ako termostat. Snímačmi tejto regulácie sú nervové zakončenia vyskytujúce sa v najväčšej miere v koži.

Termoregulácia riadi zdieľanie tepla s okolím fyzikálnou termoreguláciou a vývin tepla chemickou termoreguláciou. Fyzikálna termoregulácia ovláda teplotu

pokožky vazodilatáciou (rozšírením ciev – zvýšenie teplosmennej plochy). Krv sa ohrieva vo vnútorných orgánoch (srdci, pečeni, obličkách, svaloch aj.) a privádza ku koži tým viac tepla, čím je intenzívnejšia jeho tvorba.

Proces riadený chemickou termoreguláciou je oxidácia potravy a jej intenzita je regulovaná podľa teploty krvi [1].

Malá časť tepelnej produkcie sa môže v tele akumulovať (merná tepelná kapacita $3,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a pri trvalej akumulácii tepla (nedochádzalo by k odvodu tepla do okolia) by telesná teplota stúpala rýchlosťou $2 \text{ K} \cdot \text{h}^{-1}$ [2].

Stav tepelnej rovnováhy nastáva vtedy, keď prostredie odoberá telu toľko tepla, koľko je potrebné na udržanie normálnej telesnej teploty.

1.1 Produkcia tepla

Zdrojom energie pre činnosť vnútorných orgánov a svalov pri látkovej premene je biochemická reakcia, pri ktorej dochádza k pomalej oxidácii a metabolizovaní sacharidov, tukov a bielkovín prijatých v potrave a následne rozvedených krvou po celom tele. Tieto biochemické reakcie zabezpečujú životné procesy, ktoré sú sprevádzané tvorbou tepla – tepelnou produkciou človeka. Tepelná produkcia sa vzťahuje k povrchu nahého ľudského tela podľa [2]:

$$\frac{\dot{Q}}{A_D} = \dot{q} \left[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \right], \quad (1)$$

ktorý podľa DuBiosa závisí na hmotnosti a výške *normálneho človeka*

$$A_D = 0,204 \cdot m^{0,425} \cdot h^{0,725} \left[\text{m}^2 \right] \quad (2)$$

Pojmu *normálny človek* odpovedá človek $1,75 \text{ m}$ vysoký s hmotnosťou 75 kg . Stredný povrch dospelého muža je približne $1,9 \text{ m}^2$ a žien $1,75 \text{ m}^2$ [2].

V úplnom klúde a v stave pohody (napr. pri klúdnom spánku) dochádza v tele len k minimálnemu vývinu tepla dopovedajúcemu základnej látkovej výmene k tzv. bazálnemu metabolizmu:

$$\dot{q}_m = 44 \left[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \right] \quad (3)$$

Hodnota bazálneho metabolizmu sa znižuje s vekom a je nepatrne závislá na pohlaví jedinca. Tepelná produkcia tepla ako aj prietok vdychovaného vzduchu je závislé na intenzite fyzickej činnosti viz tab.1.1. Zo zvyšujúcou intenzitou sa zvyšujú nároky na okysličenie organizmu, pričom vzrastá prietok vdychovaného vzduchu pľúcami (pri klúdnom staní je objem vdychovaného vzduchu $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,

pri fyzickej činnosti až $9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pričom sa zvyšuje sa aj tepelná produkcia [1].

Tab.1.1: Metabolizmus človeka pri rôznej fyzickej činnosti (stupeň aktivity I až IV podľa ISO 8996) [2].

Činnosť	Stupeň aktivity	Metabolizmus q_m			Účinnosť ľudskej práce
		$\text{W} \cdot \text{m}^2$	met.	W	
kludné ležanie	I	46	0,8	80	0
sedenie		58	1	100	0
kludné stánie		70	1,2	125	0
ľahká práca	II				0 až 0,1
stredne ťažká práca	III				0,1 až 0,2
ťažká fyzická práca	IV				0,1 až 0,2

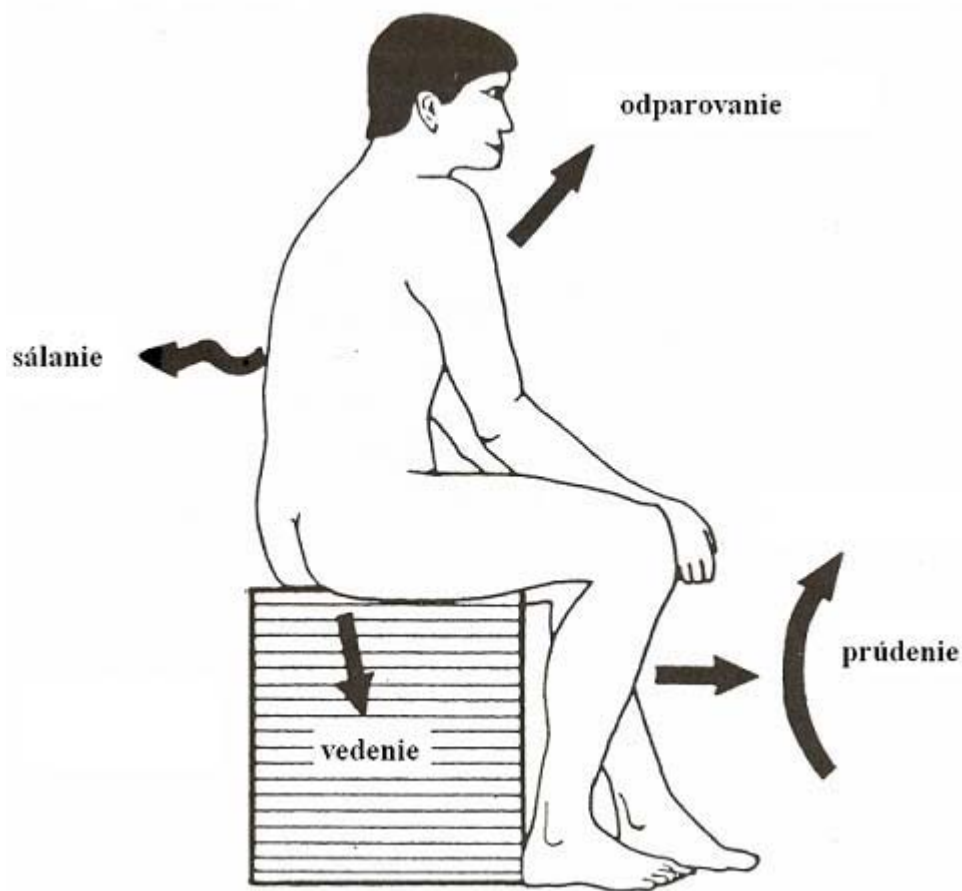
1.2 Prenos tepla medzi ľudským telom a prostredím

Obece aby bol možný prenos tepla medzi jednotlivými sústavami (napr. človek – okolie), tak musí existovať teplotný spád (teplotný gradient), ktorý je charakterizovaný rozdielom teplôt na danej dĺžke.

Prenos tepla (tepelného toku) s vnútra na povrch tela sa uskutočňuje vedením (z tkanív s vyšším obsahom vody), odparovaním, sálaním a prúdením (prenos tepelnej energie v tkanivách do krvného obehu) obr.1-2.

Prostredie v ktorom sa energia šíri pri kondukcií, musí byť vyplnené látkou (hmotou). Príčinou prenosu tepla je neustály pohyb atomárných častíc (difúzny pohyb elektrónov vo vodičoch, vibračný prenos v izolantoch [6]), pri ktorom nastáva prenos kinetickej energie medzi nimi. Prenos energie sa realizuje smerom od častíc s vyššou tepelnou energiou k časticiam s menšou tepelnou energiou až do vyrovnania teplôt. Vyššia teplota častíc je spojená s vyššou energiou.

Udržovanie konštantnej hodnoty teploty tela je možné za predpokladu tepelnej rovnováhy medzi produkciou tepla v organizme a jeho výdajom do okolitého prostredia. Na povrchu kože je tenká vrstva vzduchu, ktorá slúži ako izolácia. Hrúbka tejto vrstvy je ovplyvnená tlakom okolitého vzduchu a jeho rýchlosťou prúdenia.



Obr.1-2: Prenos tepla medzi ľudským telom a okolím [35].

Pre lepšie objasnenie nebudeme uvažovať možné akumulovanie tepla v tele, ktoré síce môže nastať, ale býva patologické. Obecne je možné tepelnú rovnováhu človeka vyjadriť podľa [2] rovnicou:

$$\dot{Q} - \left(\dot{Q}_{w1} + \dot{Q}_{w2} \right) - \left(\dot{Q}_{d1} + \dot{Q}_{d2} \right) = A_D \frac{t_s - t_p}{R} = \dot{Q}_K + \dot{Q}_R \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (4)$$

časť tepla \dot{Q} sa odvádza vyparovaním vodnej páry difundujúcej cez pokožku \dot{Q}_{w1} alebo odparovaním vylučovaného potu \dot{Q}_{w2} , dýchaním (citelné teplo \dot{Q}_{d1} a latentné teplo \dot{Q}_{d2}), tento teplotný rozdiel prechádza odevom s tepelným odporom R a s jeho povrchu A teploty t_p sa zdieľa konvekciou a radiáciou.

Prenos tepla vedením (konvekciou) je daný Fourierovým zákonom podľa [8]:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (4)$$

kde:

\dot{q} – merný tepelný tok

\dot{Q} – tepelný tok

S – plocha

λ – tepelná vodivosť

$\frac{dT}{dx}$ – teplotný gradient (dT - elementárna zmena teploty, dx – element dráhy)

Prenos tepelnej energie prúdením (konvekciou) je najčastejšie medzi prúdiacou tekutinou a nejakým ohraničujúcim povrchom. V našom prípade je tekutinou krv a ohraničujúci povrch predstavujú jednotlivé orgány ľudského tela.

Pre prenos merného tepelného toku konvekciou platí Newtonov ochladzovací zákon [7]:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_w - T_\infty) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (5)$$

kde:

α – súčiniteľ prestupu tepla

T_w – teplota povrchu obtekaného telesa

T_∞ – teplota tekutiny v dostatočnej vzdialenosti od povrchu

Pri odparovaní vody s povrchu tela je tepelná energia využitá na premenu skupenstva (pri 33 °C je to 2,4 MJ na 1 liter vody). Odparuje sa voda (potenie) difundujúca s hlbších vrstiev kože a s povrchu dýchacích ciest a tento proces predstavuje asi 25 % bazálneho metabolizmu. Rýchlosť vyparovania závisí na teplote, vlhkosti vzduchu a na rýchlosti prúdenia vzduchu [1].

Potenie predstavuje hlavný mechanizmus odvádzania tepla s organizmu. Pri nezvýšených nárokoch na termoreguláciu sa za 24 hod. odparí 600 – 800 ml potu a telo tak stráca 1500 – 2000 kJ tepelnej energie. Ochladzovací účinok potenia je najvyšší, ak je vrstva potu rovnomerne tenká a tvorí na pokožke tzv. mokrý film. V extrémne horúcom prostredí sa môže odpariť až 12 litrov za 24 hod.

Intenzita vyparovania potu (evapoácia) býva rozdielna a je riadená fyzikálnou termoreguláciou človeka. Pri zvyšovaní tepelnej produkcie (napr. pri telesnej činnosti) sa najprv zvýši prekrvenie povrchových vrstiev. Zvýši sa povrchová teplota pokožky a tým pádom narastajú tepelné straty konvekciou a radiáciou. Nastáva stav suchého potenia, kedy nie je vidieť vývin kvapôčiek potu [1].

Vyparovaním z pokožky sa odvádza teplo podľa [2] rovnicou:

$$\dot{q}_{w1} = \frac{\dot{Q}_{w1}}{A_D} = 3,05 \cdot 10^{-3} (256 \cdot \bar{t}_s - 3360 - p) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (6)$$

kde:

p – je tlak pár v okolitom vzduchu

\bar{t}_s – je stredná teplota pokožky, ktorá je pri tepelnej pohode podľa [3] daná rovnicou:

$$\bar{t}_s = 35,7 - 0,0275 \dot{q}_m \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7)$$

Teplota pokožky nebýva po celom tele rovnaká, závisí na intenzite prekrvenia príslušnej časti tela a na hrúbke podkožného tuku. Stupeň prekrvenia a tým vyvolaná zmena \bar{t}_s je dôležitým činiteľom termoregulácie človeka a býva nižšia ako vnútorná teplota tela. Dá sa stanoviť aj váhovými podielmi podľa tab.1.2.

Tab.1.2: Váhové podiely jednotlivých častí tela [2].

časť tela	čelo	dlaň	predlaktie	hrudník	chrbát	lýtka	chodidlo
	0,06	0,05	0,15	0,18	0,17	0,13	0,07

alebo podľa [2] je \bar{t}_s závislá na teplote okolia (platnosť v rozmedzí $15 < t_a < 38^\circ\text{C}$) daná vzťahom:

$$\bar{t}_s = 25,1 \cdot 1,01^{t_a} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8)$$

kde:

t_a – teplota okolia

Pri vyšších teplotách (nad 38°C) nepresahuje stredná teplota pokožky 37°C až 38°C . V stave tepelnej pohody je $\dot{q}_{w2} = 0$ (telo sa nezačína mokro potiť).

Pri fyzicky náročnejšej práci ($\dot{q}_m > 58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), kedy nestačí k odvádzaniu vlastnej tepelnej produkcie zvýšenie teploty pokožky, uvedie nervové centrum vo zvýšenej činnosti potné žľazy.

Dochádza k mokrému poteniu a vyparuje sa toľko potu v $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, koľko je potrebné na dosiahnutie tepelnej rovnováhy.

Vyparovaním vody na povrchu tela sa odvádza teplo podľa [2]:

$$\dot{q}_w = 0,42 \cdot (\dot{q}_m - 58) \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (9)$$

kde:

\dot{q}_m – merná tepelná produkcia človeka

Odvod tepla dýchaním pozostáva s toku viazaného (potrebného k odparení vody v pľúcach) a citeľného tepla podľa [2]:

$$\dot{q}_{d1} = 0,0012 \cdot \dot{q}_m \cdot (34 - t_a) \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (10)$$

$$\dot{q}_{d2} = 14,9 \cdot 10^{-6} \cdot (5880 - p_d) \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (11)$$

kde:

t_a – teplota vzduchu

p_d – tlak vodnej páry vo vdychovanom vzduchu

\dot{q}_m – celkový výdaj energie človeka (metabolizmus) a je daný súčtom tepelnej produkcie \dot{Q} a mechanického výkonu P .

$$\dot{Q}_m = \dot{Q} + P \quad [W] \quad (12)$$

Mechanická účinnosť človeka je daná podielom mechanického výkonu P a celkového výdaja energie [2]:

$$\frac{P}{\dot{Q}_m} = \eta \quad [1] \quad (13)$$

Tepelná produkcia aj účinnosť rastie s intenzitou práce tab.1.1. Ak nekoná človek mechanickú prácu, je účinnosť nulová.

Zdieľanie tepla radiáciou (sálaním) medzi povrchom odevu a okolnými plochami sa riadi Stefanovým-Boltzmanovým zákonom takto [2]:

$$\dot{q}_R = \frac{\dot{Q}}{A_R} = c \cdot \left[(t_p + 273)^4 - (t_u + 273)^4 \right] \cdot 10^{-8} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (14)$$

kde:

c – je súčiniteľ vzájomného sáľania (daný súčiniteľom sáľania povrchu odevu) a jeho veľkosť je pre dlhovlnné tepelné žiarenia, bez ohľadu na farbu a štruktúru povrchu rovná $5,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Na sáľaní sa nezúčastní celý povrch odevu, pretože niektoré časti sú vzájomne prekryté a pre sáľajúci povrch odevu platí podľa [2]:

$$A_R = f_R \cdot f_c \cdot A_D \quad [m^2] \quad (15)$$

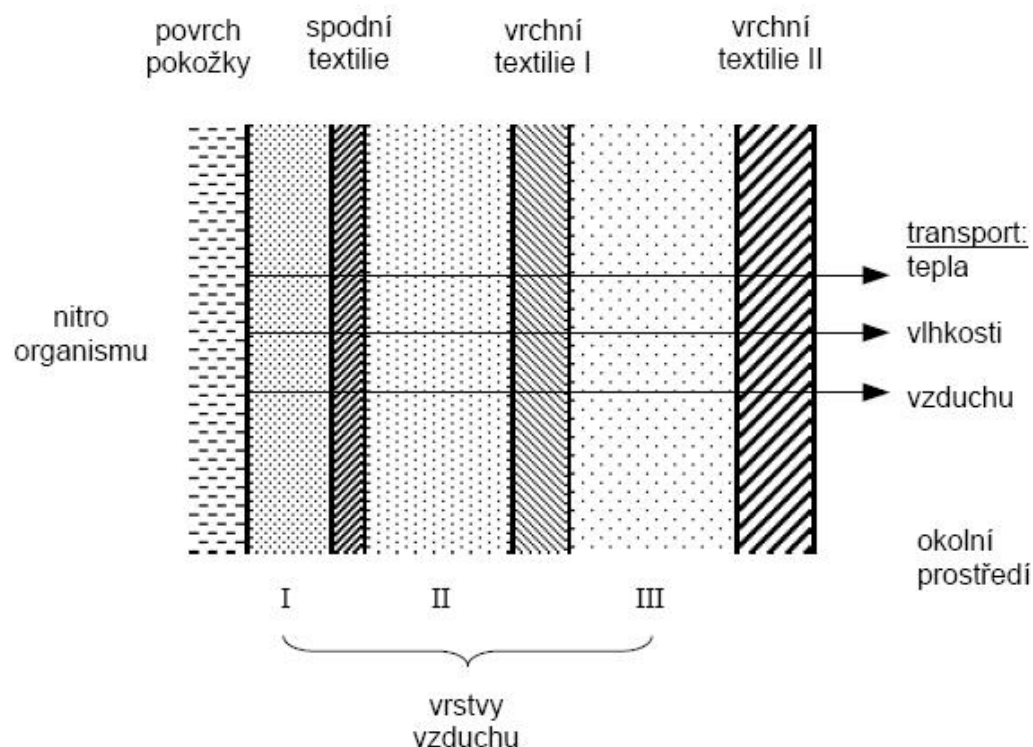
kde:

f_R – súčiniteľ ktorý má u sediacej osoby hodnotu 0,7 a u stojacej osoby má hodnotu 0,73.

t_u – spoločná teplota všetkých okolných plôch, pri ktorej bol sáľaním zdieľaný rovnaký tepelný tok medzi povrchom odevu a okolitými plochami.

1.3 Tepelný odpor odevu

Pri odvode tepelného toku s tela musí tepelný tok prekonať tepelný odpor odevu R , ktorý závisí predovšetkým na počtu vrstiev odevu, jeho hrúbke, tepelne izolačných vlastnostiach, tepelnej priepustnosti a na teplote pokožky. Jednotlivé vrstvy sú od seba oddelené vzduchovými vrstvami obr.1-3, ktoré spolu s vlastnosťami použitých textílií (nasiakavosť, priedušnosť atď.) tvoria tzv. mikroklimu.



Obr.1-3: Schéma transportu tepla odevným systémem [4].

Tepelný odpor odevu tvorí podľa [4] vrstvy látky a vzduchové vrstvy a dá sa vyjadriť:

$$R = \sum \left(\frac{A}{\lambda} \right)_{tk} + \sum \left(\frac{S}{\lambda} \right)_{vzd} \quad [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] \quad (16)$$

kde:

A – povrch odevu

λ – tepelná vodivosť na strane látky (tk) a strane vzduchu (vzd)

Jednotkou pre tepelný odpor je 1 clo a závisí na druhu a skladbe odevu tab.1.3 a dá sa určiť [4]:

$$1 clo = \frac{R}{0,155} [-] \quad (17)$$

Tab.1.3: Tepelný odpor (clo) a súčiniteľ zväčšenia povrchu oblečeného človeka (fc) [4].

Počet vrstiev	Druh a skladba odevu	Tepelný odpor (clo)	Zväčšenie povrchu človeka (fc)
0	bez odevu	0	1
1	bikiny	0,01	1
1	krátke nohavice	0,1	1
1	veľmi ľahký	0,3 - 0,4	1,05
1	ľahký letný	0,5	1,1
2	ľahký pánsky letný	0,8	1,1
3	spoločenský oblek	1,0	1,15
4	zimný oblek	1,5	1,2
6	zimný pracovný ťažší	2,2	1,35
7	polárny odev	3 - 4	1,4

f_c – je súčiniteľ zväčšenia povrchu oblečeného človeka. Má hodnotu podľa počtu vrstiev odevu viz tab. 1.3 a početne sa dá vyjadriť podľa [2]:

$$f_c = 1,05 + 0,645R \text{ pre } R > 0,078 \left[m^2 \cdot K \cdot W^{-1} \right] \quad (18)$$

$$f_c = 1 + 1,29R \text{ pre } R \leq 0,078 \left[m^2 \cdot K \cdot W^{-1} \right] \quad (19)$$

Mikroklíma je označenie relatívne malej oblasti, ktorá sa odlišuje svojimi vlastnosťami od okolného prostredia. Charakter mikroklímy je určený fyzikálnymi faktormi – teplotou, relatívnou vlhkosťou, rýchlosťou prúdenia vzduchu a vymedzuje oblasť subjektívneho pocitu tepelnej pohody či nepohody. Veličiny sú navzájom závislé a zmena jednej s veličín má za následok i zmenu ostatných veličín. Pre tepelný stav človeka, pre jeho tepelnú bilanciu, je rozhodujúce v akom vzťahu je vyprodukované množstvo tepla, ku množstvu tepla, ktoré je odvádzané z organizmu do okolného prostredia.

1.4 Tepelná pohoda

Optimálnej tepelnej pohody je dosiahnuto pri rovnovážnej tepelnej bilancie [22]. Vtedy je produkcia metabolického tepla daného fyzickou aktivitou v rovnováhe s teplom dovádzaným s tela do okolitého prostredia, pri dodržaní požadovaného rozmedzia asymetrie sálavej a konvekčnej zložky zdieľania tepla a priestorovej

asymetrie operatívnej teploty [21].

Operatívna teplota je vypočítaná hodnota a je definovaná ako jednotná teplota uzatvoreného (rovnaká teplota vzduchu aj stredná radiačná teplota) čierneho priestoru (s hľadiska radiácie), v ktorom by ľudské telo zdieľalo konvekciou a sálaním rovnaké množstvo tepla ako v skutočnom, teplotne nerovnovážnom prostredí [19].

Operatívna teplota t_o je daná podľa [2] vzťahom:

$$\alpha_K \cdot (t_p - t_a) + \alpha_R \cdot (t_p - t_u) = \alpha \cdot (t_p - t_o) \quad (20)$$

$\alpha = \alpha_K + \alpha_R$ a úpravou dostávame

$$t_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot t_u \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (21)$$

$$A = \frac{\alpha_K}{\alpha} = 0,75 \cdot v_{ar}^{0,16}, \text{ pre } v_{ar} = 0,05 \div 1 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (22)$$

kde:

α_K – súčiniteľ prestupu tepla konvekciou

α_R – súčiniteľ prestupu tepla radiáciou

t_p – teplota pokožky

t_a – teplota okolného vzduchu

t_u – spoločná teplota okolných plôch

v_{ar} – relatívna rýchlosť prúdenia vzduchu voči človeku

Závislosť hodnoty A na rýchlosti prúdenia vzduchu voči človeku je zobrazená v tab.1.4.

Tab.1.4: Závislosť A na rýchlosti prúdenia [3]

$v_{ar} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
$A \text{ [-]}$	0,5	0,53	0,6	0,65	0,7	0,75

Pri rýchlostiach vzduchu pod $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je možné operatívnu teplotu nahradiť teplotou guľového teplomeru podľa nariadenia vlády č.178/2001 Sb. nasledovne:

-pre guľový teplomer o $\varnothing 100 \text{ mm}$:

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2,9 \cdot 10^8 \cdot v_{ar}^{0,6} \cdot (t_g - t_a) \right]^{0,25} - 273 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (23)$$

-pre guľový teplomer o $\varnothing 150 \text{ mm}$:

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot v_{ar}^{0,6} \cdot (t_g - t_a) \right]^{0,25} - 273 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (24)$$

kde:

t_g – teplota guľového teplomeru

t_r – stredná radiačná teplota

Teplota guľového teplomeru vyjadruje vplyv teploty vzduchu a radiačnej teploty (sálavá zložka), neberie v úvahu vlhkosť vzduchu.

Pri známej hodnote strednej radiačnej teploty a teploty vzduchu sa hodnota operatívnej teploty dá vypočítať podľa [3]:

$$t_o = t_r + A(t_a - t_r) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (25)$$

Hodnoty operatívnych teplôt v závislosti na ročnom období, kategórií práce a pri istých rýchlostiach prúdenia sú uvedené v tab.1.5 (teplé obdobie) a tab.1.6 (chladné obdobie) podľa [9]:

Tab.1.5: Operatívne teploty (teplé ročné obdobie) – optimálna t_o (horný údaj) a prípustná $t_{o,A}$ (dolný údaj) [9].

Kategória práce	Produkcia tepla [W/m ²]	ROČNÉ OBDOBIE		
		TEPLÉ		
		v_{ar} [m/s]	R [m ² .K/W]	
			0,08	0,11
I veľmi ľahká	60 - 75	0,1	26 - 24	25 - 23
			28 - 26	27 - 25
II ľahká	75 - 100	0,2	24,5 - 21,5	23,5 - 20
			26,5 - 24,5	25,5 - 23
III stredne ťažká	100 - 125	0,2 - 0,3	21,5 - 19,5	20 - 17,5
			24 - 22	22,5 - 20
IV ťažká	125 - 155	0,3 - 0,4	19,5 - 17	17,5 - 14,5
			21,5 - 19,5	19,5 - 17
V veľmi ťažká	155 - 190	0,4 - 0,5	17 - 14	14,5 - 11
			19 - 17	16,5 - 14

Tab.1.6: Operatívne teploty (chladné ročné obdobie) – optimálna t_o (horný údaj) a prípustná $t_{o,A}$ (dolný údaj) [9].

Kategória práce	Produkcia tepla [W/m ²]	ROČNÉ OBDOBIE		
		CHLADNÉ		
		v_{ar} [m/s]	R [m ² .K/W]	
			0,11	0,155 0,23
I veľmi ľahká	60 - 75	< 0,1		22 - 20
				20 - 18,5 17,5 - 15
II ľahká	75 - 100	< 0,2		20,5 - 17
				19 - 16 15,5 - 12
III stredne ťažká	100 - 125	0,2 - 0,3		17,5 - 14,5
				16 - 13,5 12 - 8,5
IV ťažká	125 - 155	0,3	17,5 - 14	14,5 - 10,5
				13 - 9,5
V veľmi ťažká	155 - 190	0,3 - 0,4	14 - 10,5	10,5 - 6,5
				9 - 5,5

Pre danú tepelnú produkciu môžeme tepelnú pohodu dosiahnuť vhodnou kombináciou nasledujúcich faktorov, ktoré vplyvajú na pocit tepelnej pohody:

- teplota vzduchu
- teplota stien a predmetov
- rýchlosť prúdenia vzduchu
- tepelný odpor odevu a voľba počtu vrstiev
- vlhkosť vzduchu (pri relatívnej vlhkosti medzi 30-70 % je jej vplyv zanedbateľný [19]).

S uvedených faktorov ovplyvňujúcu tepelnú pohodu vyberáme:

Teplota vzduchu – patrí medzi základnú veličinu, ktorá vypovedá o stave tepelnej záťaže – tepelnej pohode človeka. V norme ČSN EN ISO 7933 sú uvedené doporučené hodnoty teploty vzduchu pre pracovné prostredie v závislosti na triedach práce, tj. na energetickom výdaji vzhľadom k činnosti a odevu, ktoré by mali zaistiť optimálnu tepelnú pohodu pre väčšinu osôb [19].

Rýchlosť prúdenia vzduchu – s vzrastajúcou rýchlosťou prúdenia vzduchu stúpa rýchlosť odvodu tepla konvekciou – zvyšujú sa straty tepla. Tento stav sa nazýva Wind Chill faktor („ochladenie vetrom“ pocitová alebo ekvivalentná teplota) a vyjadruje stratu tepla pri súčasnom pôsobení vetra a je priamo úmerný tepelnému gradientu a rýchlosti prúdenia vzduchu tab.1.7. Ekvivalentná teplota nie je fyzikálna veličina, ale je to pocitová teplota ktorá nám dáva predstavu, akú teplotu pri intenzívnom prúdení vzduchu pociťujeme [23].

Pri nízkych rýchlostiach prúdenia vzduchu (pod 0,15 m/s) je tenká vrstva vzduchu okolo tela ohrievaná vlastným vyprodukovaným teplom a je vytvorené tzv. mikroklima. Nepříjemný pocit chladu vzniká, keď sa zvýšenou intenzitou prúdenia odstraňuje tenká vrstvička ohriateho vzduchu okolo tela. Vyššie rýchlosti prúdenia zas môžu pôsobiť rušivo a vyvolávať prílišné ochladenie, ktoré môže spôsobiť pocit diskomfortu. Ak je povrch tela nadmerne ochladzovaný intenzívnym (napr. použitím stolného ventilátora v letnom období) odparovaním potu, môže dôjsť prechladnutiu [19]. Doporučované rýchlosti prúdenia vzduchu sú pre pracovné prostredia $0,1 \div 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ v závislosti na druhu činnosti a použitom odevu [20].

Tab.1.7: Ekvivalentná teplota v závislosti na teplote vzduchu a rýchlosti prúdenia [23].

		Rychlost větru v km/hod			
		10	20	30	40
Teplota vzduchu ve °C	14	12	8	6	5
	12	10	6	3	2
	10	8	3	1	-1
	8	5	1	-2	-4
	6	3	-2	-7	-9
	4	1	-5	-10	-12
	2	-1	-7	-11	-13
	0	-4	-10	-14	-16
	-2	-6	-12	-16	-19
	-4	-8	-15	-19	-22
	-6	-10	-17	-22	-25
	-8	-12	-20	-25	-28
	-10	-15	-23	-28	-31
	-12	-17	-25	-30	-34
	-14	-19	-28	-33	-37

Pri nerovnomernom miestnom ochladzovaní tela (rýchlostný priebeh prúdenia nie je rovnomerný), môže dôjsť k pocitu prievanu, ktorý máva pulzný charakter. Pulzácia prúdiaceho vzduchu dráždi nervové kožné bunky citlivé na teplotu, a tým sa zväčšuje pocit chladu. Pulzácia vzduchu je spôsobená flukтуаčnými zložkami rýchlostí, ktoré charakterizujú intenzitu turbulencie. Najcitlivejšie na turbulenciu sú odkryté časti tela, najmä hlava [2].

2 HODNOTENIE TEPELNÉHO STAVU PROSTREDIA

Priamou metódou pre určovanie tepelného stavu prostredia je jeho hodnotenie prostredníctvom pokusných osôb [12]. Na základe ich výpovedí je možné získať súbor subjektívnych hodnôt, z ktorých môžeme po štatistickom spracovaní dostať strednú hodnotu tepelného pocitu pre daný stav prostredia. Vzhľadom na časovú, finančnú a organizačnú náročnosť sa tento spôsob používa prevažne vo výskume. S týchto dôvodov a v súvislosti s rozvojom potenciálu výpočtovej techniky boli vytvorené matematické modely, ktoré umožňujú simuláciu vnímania tepelného stavu prostredia podobne, ako ľudský organizmus.

Tieto matematické modely zahrňujú v sebe parametre okolitého prostredia (teplota, vlhkosť vzduchu), zjednodušeného fyzikálneho modelu ľudského tela. Väčšina modelov je vytvorených len pre určité definované priestory s danými parametrami a pre ktoré boli overené meraním [13].

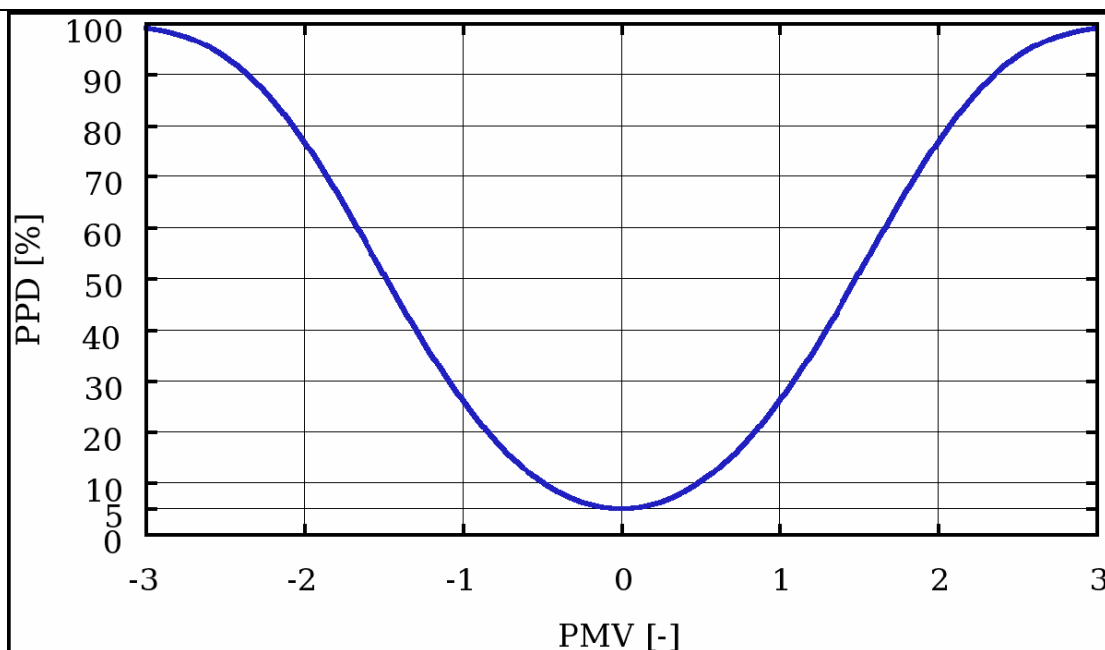
2.1 Model PMV - PPD

Z technických a ekonomických dôvodov a vzhľadom k individuálnym odchýlkam fyziologických funkcií ľudí, nie je možné zaistiť kombináciu veličín (určujúcich tepelný stav prostredia), ktoré by zaistili pocit tepelnej pohody väčšine osôb v sledovanom priestore. Vždy bude existovať určité percento nespokojných ľudí (PPD), ktorý budú pociťovať tepelnú nepohodu (diskomfort) [2].

Doporučené podmienky tepelnej pohody sú dané štatisticky pomocou stupnice tepelných pocitov PMV (Predicted Mean Vote), chápaných ako stupnica pohodlia či nepohodlia podľa [19]:

- + 3 horúco
- + 2 teplo
- + 1 mierne teplo
- 0 neutrálne (tepelná pohoda)
- 1 mierne chladno
- 2 chladno
- 3 zima

Táto hodnota nás informuje o tepelnom pociť referenčného jedinca, ktorý zastupuje celú skupinu respondentov. Je preto potrebné vyhodnotiť, s akou pravdepodobnosťou sa pri daných podmienkach bude cítiť celá skupina ľudí. K tomu sa používa PPD index a na obr.2-1 je grafické znázornenie funkčnej závislosti $PPD = f(PMV)$ [3].



Obr.2-1: Funkčná závislosť predpovede percentuálneho podielu nespokojných ľudí (PPD) na predpovedi stredného tepelného pocitu (PMV) [3].

Z grafu sa dá vyčítať, že vždy aspoň 5% časť zo skupiny bude nespokojná s daným mikroklimatom.

Percentuálny podiel nespokojných (PPD) z prítomných ľudí v určitom prostredí, súvisí s hodnotami stupnice tepelných pocitov vzťahom podľa [2]:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp\left(-0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2\right) [\%] \quad (26)$$

- platí podľa ISO 7730 pre tepelne miene prostredie takto:

PMV	0	± 0,5	± 0,83	± 1	± 2
PPD %	5	10	20	25	75

2.2 Model ekvivalentnej teploty a komfortných zón

Hlavným kritériom pre hodnotenie tepelného prostredia týmto modelom je ekvivalentná teplota t_{eq} . Je to fyzikálna veličina definovaná ako teplota homogénneho priestoru pri strednej radiačnej teplote, ktorá je rovná teplote vzduchu a nulovej rýchlosti prúdenia, v ktorej si osoba vymení rovnakú tepelnú stratu konvekciou a radiáciou ako v skutočných podmienkach [39].

Postup vyhodnocovania ekvivalentnej teploty a komfortných zón je uvedená v norme ČSN EN ISO 7730. Tento model nám umožňuje vyhodnocovať segmentové ekvivalentné teploty. Každému segmentu ľudského tela je priradených 5 komfortných zón, ktorým odpovedá príslušný rozsah ekvivalentnej teploty.

Vynesením závislosti komfortných zón na teplote vznikne diagram komfortných zón. Lokálny prístup je výhodne použiť pre hodnotenie stavu mikroklímy v nehomogénnom prostredí. Nevýhodou je obmedzený rozsah aktivít človeka (70 a 90 W/m^2) a tepelného odporu odevu [39].

2.3 Fialov model

Rozdiel medzi vyššie zmienenými modelmi je v tom, že Fialov model uvažuje pri vyhodnocovaní komfortu fyziológiu človeka. Z hľadiska regulácie je telo rozdelené na dva prepojené neoddeliteľné systémy. Jedná sa o regulovaný pasívny a regulačný aktívny systém.

Pasívny systém je matematický model ľudského tela popisujúci prenos tepla z telesného jadra k povrchu tela a následný odvod tepla s povrchu (vedením, prúdením, vyparovaním a radiáciou) do okolia. Rovnica pre vnútorný prenos zahrňuje vedenie tepla v tkanivách, produkciu metabolického tepla ako aj krvný obeh v tepnách. Model zohľadňuje aj tepelnú stratu dýchaním a je rozdelený na 15 priestorových segmentov v tvare válca a gule. Jednotlivé segmenty sú zložené z viacerých vrstiev (až 6 druhov tkanív a oblečenia) [14].

Aktívny systém je matematický model simulujúci aktívne ľudské termoregulačné pochody, ako je svalový tras, vazodilatácia ciev v pokožke. Odozvy termoregulačného systému ľudského tela riadeného hypotalamom [1], spätne ovplyvňujú pasívny systém [14].

Fiala odvodil matematickú reprezentáciu termoregulačných odoziev z nameraných údajov pomocou regresnej analýzy pre široké rozmedzie teplôt vzduchu (5 - $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$) a činnosti človeka ($0,8$ - 10 met) [15].

Výsledkom jeho fyziologického modelu je predpoveď strednej teploty pokožky a teploty vo vnútri tela (teplota jadra) za daných podmienok prostredia. Časová zmena strednej teploty pokožky a jadra, je vyhodnotená vstupným indexom celkového dynamického pocitu. Tento index nezohľadňuje asymetrické podmienky pri vyhodnotení tepelného komfortu, ale zohľadňuje jednotlivé váhy ľudského tela (viz tab.1.2.) na celkový tepelný komfort a výpočet povrchových teplôt na základe zjednodušenej geometrie ľudského tela [13]. Tento model je s malou modifikáciou zahrnutý do programu Theseus-FE 2.1 a Radtherm 8 [16].

2.4 Berkeley model

Model vychádza z viac segmentového modelu, ktorý navrhol Stolwik a má veľa spoločných rysov s predchádzajúcim modelom (Fialov model). Je rozšírený o proti prúdu výmenu tepla krvou a o výpočet uhlových faktorov pre vyhodnocovanie radiačného prenosu tepla. Model je rozdelený na 16 častí a každá časť obsahuje 4 vrstvy: svaly, tuk, pokožku a odev. Výstupom je podobne ako u Fialovho modelu predpoveď teploty pokožky a vnútra tela [17].

Na tento model naviazala Zhang (2003), ktorá vytvorila 4 modely pre vyhodnotenie miestneho i celkového tepelného pocitu, na základe vyhodnotenia vlastných meraní pre jednotlivé časti tela a porovnávala je so štatistickými výsledkami z dotazníku skúšobných osôb. Pre ich vyhodnotenie rozšírila klasickú 7 bodovú stupnicu na 9 bodov. Lokálny tepelný pocit je spočítaný z rozdielu lokálnej teploty danej časti a strednej teploty pokožky [18].

Výhodou Berkeleyho modelu (prepojením s modelom Zhang), je schopnosť simulovať odozvy v prechodovom a nehomogénnom prostredí, ďalej v lokálnom prístupe vyhodnocovania tepelného pocitu a komfortu. V súčasnej dobe je najprepracovanejším modelom pre hodnotenie tepelného komfortu a v roku 2009 má byť dokončená implementácia tohto modelu do programu Theseue-FE [13].

Zhnutie modelov: Berkeley a Fialov model je v porovnaní s ostatnými zmieňovanými modelmi presnejší, pretože dokáže simulovať jednotlivé fyziologické pochody v ľudskom tele. Oba modely sa dajú použiť na jednotlivca v ľubovoľnom prostredí. Model PMV-PPD je vhodný použiť pri vyhodnotení tepelnej pohody vo väčších priestoroch s väčším počtom ľudí s rôznymi odchýlkami fyziologických funkcií.

3 TEPELNÝ MANEKÝN

Rôzne druhy manekýnov (aktívne, pasívne, tepelné) sa v účastnej dobe používajú na simulovanie ľudského tela pre rôzne účely. Používajú sa napríklad na simuláciu pasívnej bezpečnosti v automobiloch pri bezpečnostných testoch vozidiel, na meranie tepelného komfortu prostredia ako aj na meranie odevných charakteristík (tepelná izolačnosť, priedušnosť, prestup a absorpcia vodných pár atď.). Tepelný manekýn dokáže za určitých podmienok a vzhľadom na skúmanú vec, realisticky napodobniť ľudské telo, čo je výhodné v situáciách, kedy by bolo použitie človeka nebezpečné. Manekýni sa s výhodou používajú pri meraniach, ktoré sú dlhodobo časovo náročné. Hodnoty získané meraním na manekýnoch sa môžu priamo použiť ako vstupy pre rôzne matematické modely, určené napríklad k predpovedi tepelných reakcií.

3.1 *História tepelných manekýnov*

Prvý manekýn "Manichino" bol objavený v Taliansku vo Florencii koncom 15. storočia. Bol používaný ako predloha na základné kreslenie postavy. Jedným s prvých používateľov týchto umeleckých manekýnov bol Taliansky renesančný maliar Frà Bartolomeo.

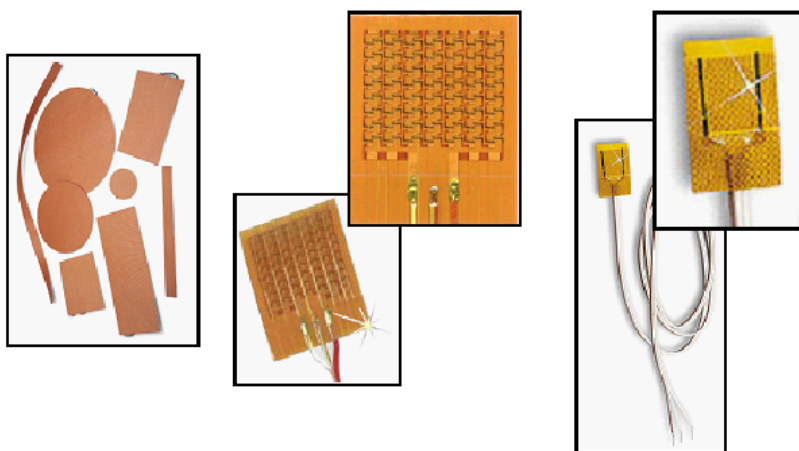
Prvý tepelný manekýn bol vyrobený z medi pre americkú armádu počas 40. rokov (Belding, 1949). Belding najprv postavil bezhlavého a bezrukého manekýna z trubiek a kovových listov, ktorý mal vo vnútri zabudovaný ohrievač s ventilátorom pre distribúciu tepla [11].

V roku 1942 spolupracoval Belding s firmou General Electric Corporation a skonštruoval nového tepelného manekýna. Tento manekýn bol vytvorený s pokovanej medenej škrupina s elektrickými obvodmi, ktoré rovnomerne ohrievali plochu. Manekýn umožňoval meniť povrchovú teplotu rúk a nôh nezávisle na povrchovej teplote zvyšku tela. Niektoré z nich sa používali na výskum a meranie vnútorného prostredia. Postupným znížením cien materiálov sa manekýni začali vyrábať prevažne s hliníka a plastov, čo viedlo k výraznému zníženiu hmotnosti manekýna. Ďalším výrazným krokom dopredu bolo zavedenie modernejších regulačných techník, čo umožnilo flexibilnejšie použitie a presnejšie meranie. Manekýni boli od tej doby konštruované s kĺbmi, čo umožňovalo lepšiu manipuláciu s nimi a rozšírila sa aj oblasť použitia [10].

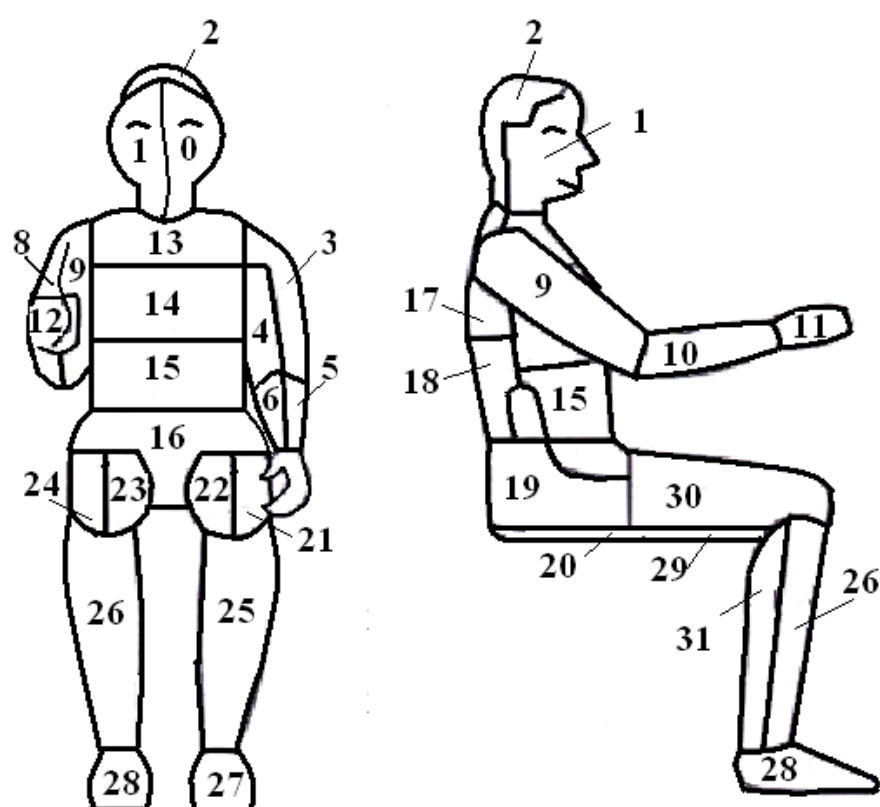
Potreba detailnejších informácií viedla k výrobe manekýnov s niekoľkými nezávisle kontrolovateľnými segmentmi po celom povrchu tela, čo umožňovalo merať lokálne tepelné toky jednotlivých častí tela. Sú to tepelný manekýni tzv. druhej generácie. Norma ČSN EN ISO14505-2 doporučuje rozdelenie na 32 obr.3-1

alebo 16 segmentov obr.3-2.

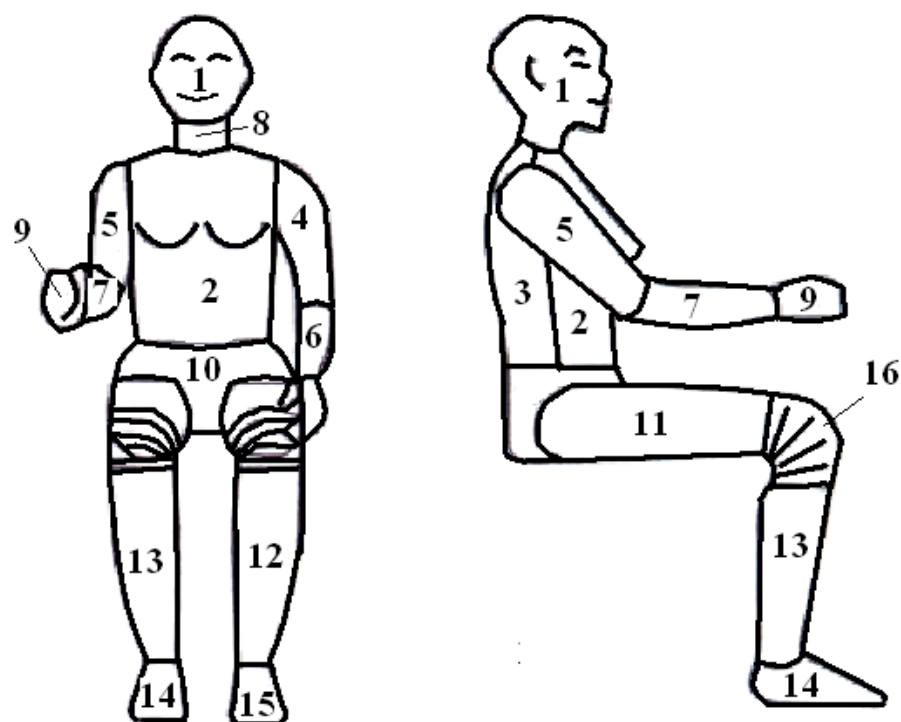
Na meranie jednotlivých tepelných tokov sa používajú snímače typu umelá koža, ktoré sa rozmiestňujú na jednotlivé segmenty figuríny. Senzory typu umelá koža simulujú svojím tepelným chovaním a pôsobením na okolie skutočnú ľudskú kožu. Z hľadiska tepelného účinku sa jedná o vyžarovanie tepelného toku do okolia. Ľudské telo v závislosti na aktuálnom fyzickom a psychickom stave, vyžaruje cez kožu tepelný tok $50-200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Snímače typu umelá koža, musia vedieť meniť hodnotu vyžiareného výkonu. Snímač sa skladá obr.3-3 s ohrievacieho telesa, snímača tepelného toku a povrchovej teploty [31].



Obr.3-3: Znáozornenie snímača typu umelá koža [31].



Obr.3-1: Zobrazenie 32 segmentov figuríny [31].



Obr.3-2: Zobrazenie 16 segmentov figuríny [31].

4 EXPERIMENT

V tejto kapitole sa budeme podrobne zaoberať experimentom, s ktorého údaje budú použité k validácii CFD výpočtu.

Nielsen (2003) vytvoril v spolupráci s univerzitami Aalborg (Dánsko) a Gävle (Švédsko) skúšobné testy, ktoré boli zamerané na prúdenie vzduchu okolo tepelného manekýna, CSP (Computer Simulation Person), alebo CFD (Computational Fluid Dynamics).

Tento skúšobný test je zameraný na prúdenie vzduchu a tepelných strát okolo tepelného manekýna typu Comfortina od firmy PT-Teknik s lokálnou špecifikáciou tepelných tokov jednotlivých častí tela, s rovnomernou špecifikáciou tepelných tokov na povrchu manekýna. Počas experimentu sa zaznamenávali hodnoty rýchlostí a teplôt v daných rovinách a diskrétnych bodoch.

Porovnanie a následné vyhodnocovanie skúšobného testu, sa bude prevádzať na základe vytvoreného výpočtového CFD modelu virtuálnej figuríny. Model virtuálnej figuríny dopovedá svojimi rozmermi modelu tepelného manekýna Comfortina.

4.1 Model tepelného manekýna

Model ženského tepelného manekýna Comfortina obr.4-1 je vyrobená z kvalitných sklenených vlákien s hliníkovými krúžkami, na ktorých sú namontované pohyblivé kĺby. Ženský manekýn (konfekčná veľkosť 38, výška 1,68 m, váha 20 kg) je viac segmentový a skladá sa z 11 častí.

Na povrchu manekýna je opatrne navinutý a ukotvený niklový drôt, ktorý sprostredkováva vedenie tepla a je prekrytý silnou polyuretánovou vrstvou. Meranie odporu niklového drôtu poskytuje strednú plošnú teplotu v jednotlivých častiach tela. Všetky telové segmenty sú jednotlivo kontrolované mikroprocesorom, ktorý prepočítava potrebné napájanie a ovplyvňuje veľkosť odporu (tepelného toku). Veľkosť tepelného toku je možný až do 200 W.m^2 s odchýlkou $0,1 \text{ W.m}^2$. Software kontroluje teplotu na každom úseku približne 40 krát za sekundu, tepelné straty kontroluje 8 krát za sekundu a aktualizácia teplôt je na základe meraní 5 teplôt s ktorých najvyššiu a najnižšiu ignoruje [24].

Mikroprocesor zachováva teploty priemerného človeka v stave tepelnej pohody, komfortu. Napájanie je prúdovým spínacím zdrojom v rozsahu striedavého napätia 100 až 24 V. Výstupné, jednosmerné napätie má hodnotu 24V a frekvenciu 40 Hz [24].

Všetky nastavenia a kalibrácie sú uložené vo vnútri každého dielu čo znamená, že každá časť tela môže byť použitá samostatne, nezávisle na ostatných

častiach tela. Spojovacia doska v dolnej a hornej časti tela spojuje dohromady všetky regulátory, ktoré sú pripojené jedným 5mm káblom k sériovému portu PC. Figurína je dodávaná s hliníkovými klíbmí na zápästí, ramenách, krku, kolenách a bedrách. Rozsah pohybu dolných končatín je v ohybe kolien v rozsahu 0 až 90°, rotácia v bedrových kĺboch je v rozsahu 0 až 100° čo umožňuje nastaviť figurínu do požadovanej polohy. Ramená sa môžu otáčať v rozsahu až 300°. Hlava sa môže otáčať doprava, doľava do uhlu 45° [24].

Pre jednoduchú dopravu a skladovateľnosť je možné figurínu rozdeliť na dve časti, s predelom v oblasti pásu. Horné končatiny sa dajú v ramenách úplne oddeliť od torza tela [24].



Obr.4-1: Model tepelného ženského manekýna Comfortina [25].

4.2 Model klimatickej komory

Experiment sa prevádzal na Aalborg Univerzite v Dánsku v rámci International centre for Indoor Enviroment and Energy. Ženský tepelný manekýn Comfortina (pt-teknik.dk) Madsen (1999) sa umiestnil na požadované miesto do klimatickej komory o rozmeroch:

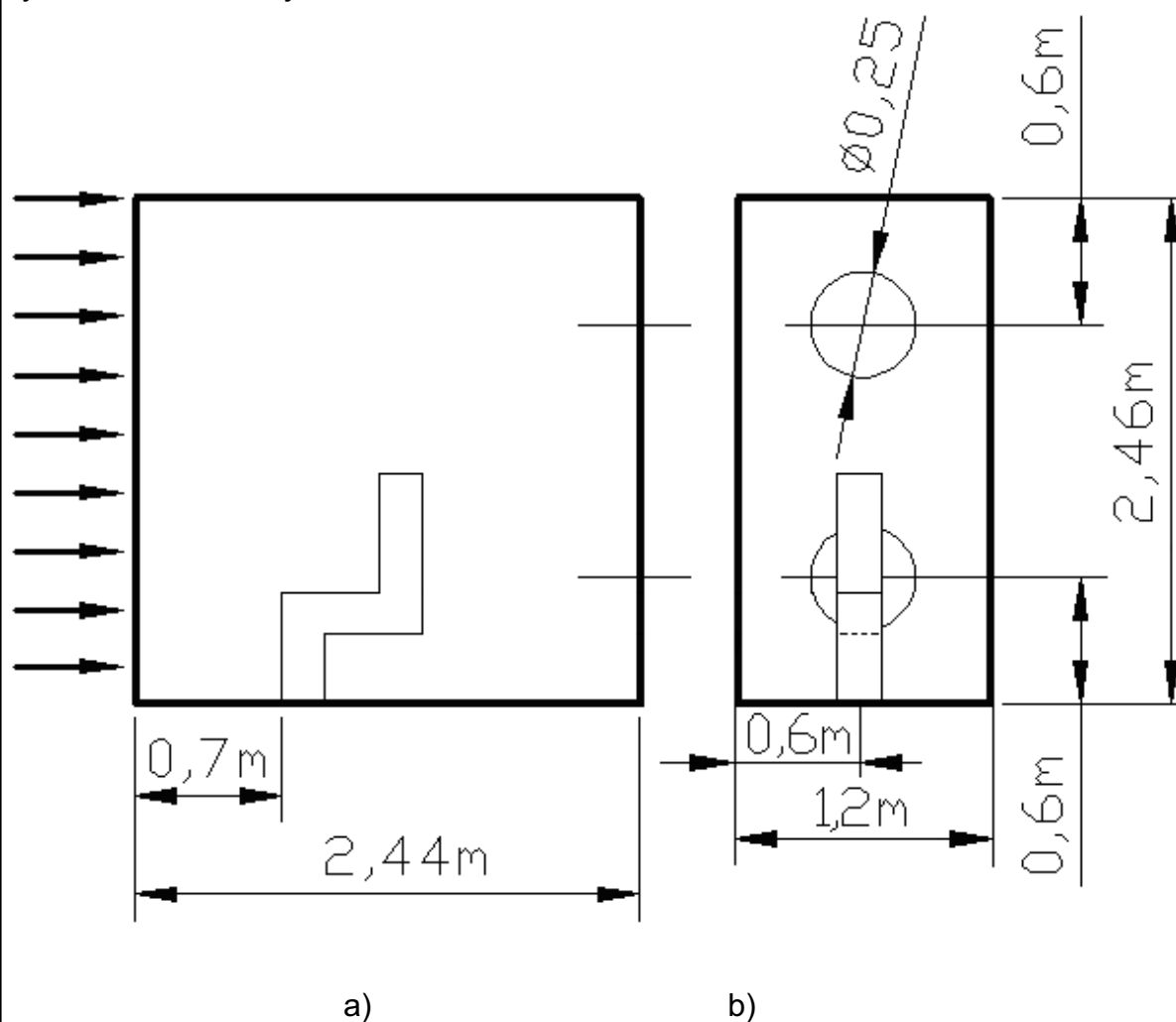
x = 2,44 m (dĺžka),

y = 2,46 m (výška),

z = 1,2 m (šírka).

Schematické znázornenie klimatickej komory s umiestnenou geometriou tepelného manekýna s jednotlivými rozmermi je znázornená na obr.4-2.

Manekýn bol umiestnený v strede miestnosti vo vzdialenosti 0,7 m od čelnej steny, cez ktorú sa do miestnosti vháňal vzduch. Vzduch sa do komory vháňal s okolitej haly (priemerná teplota vzduchu v hale 20,4 °C) ventilátorom cez prírodné potrubie, na ktorého konci, sa nachádzal difúzor, ktorý mal zabezpečovať rozptýlenie vzduchu po celom priereze čelnej steny komory. Pre dosiahnutie voľného zatopeného prúdu v klimatickej komore sa pred difúzor umiestnila priedušná látka (táto priedušná látka, tvorila čelnú stenu). Vzduch vstupoval do komory konštantnou rýchlosťou $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a bol odvádzaný dvoma kruhovými výstkami na zadnej stene obr.4-3.



Obr.4-2: Schematické znázornenie klimatickej komory a) bočný pohľad, b) pohľad na zadnú stenu s umiestnenými kruhovými výstkami.



Obr.4-3: Odvádzanie vzduchu cez kruhové výustky [36].

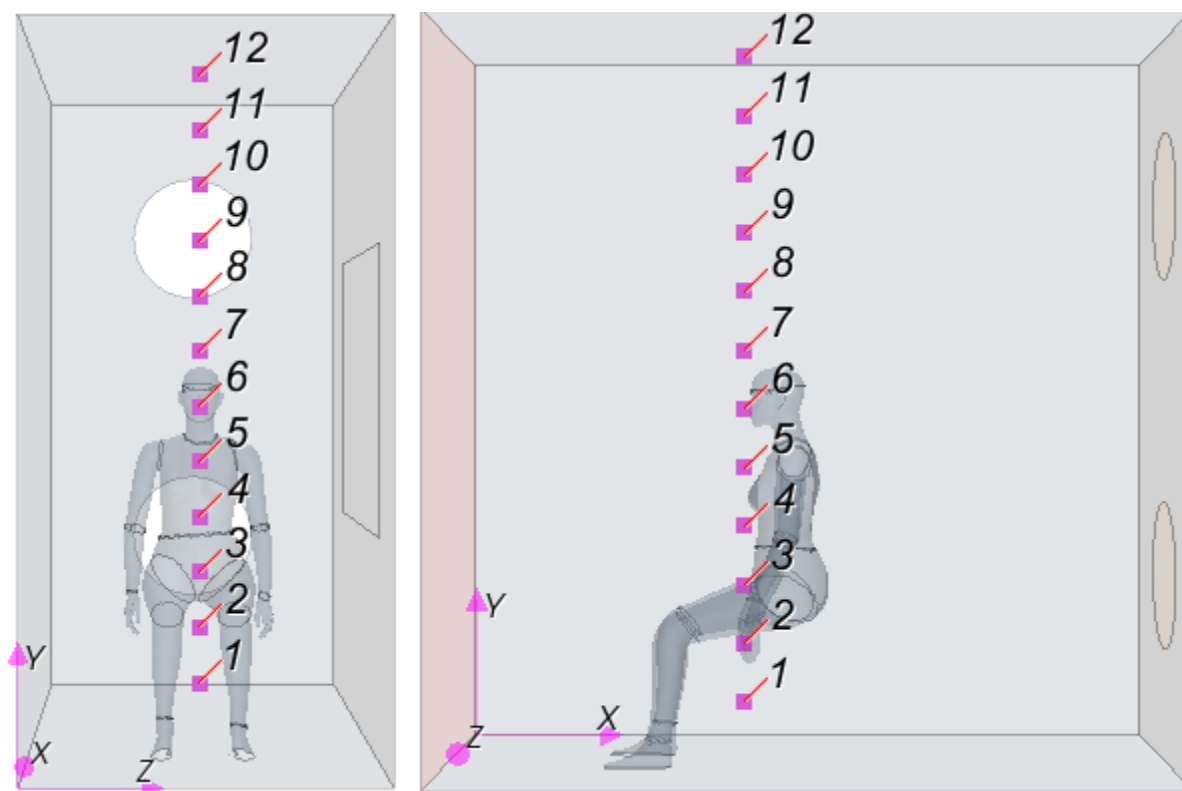
4.3 Spôsob merania

4.3.1 Meranie teploty

Pre zisťovanie tepelného stavu prostredia v klimatickej komore, boli použité na meranie teploty (v diskretných bodoch) termočlánky, s dvojicou kovov meď - konstantan s termoelektrickým napätím $50 \mu V \cdot K^{-1}$, ktoré sú vhodné na meranie teplôt do $400^\circ C$ (podľa normy ČSN 356710).

Meranie teplôt v klimatickej komore bolo prevedené na 38 miestach s presne definovanou polohou termočlánkov. Termočlánky boli upevnené na tenkých drevených tyčiach kruhového prierezu, v požadovanej výške a vzdialenosti.

Prvých 12 termočlánkov bolo umiestnených pred tepelným manekýnom (meracie body 1÷12 viz obr.4-4 o súradniciach viz tab.4.1 s uvedenými priemernými teplotami. Tieto priemerné teploty sú aritmetickými hodnotami, získaných z 21 meraní.



Obr.4-4: Zobrazenie umiestnenia 12 termočlánkov pred tepelným manekýnom.

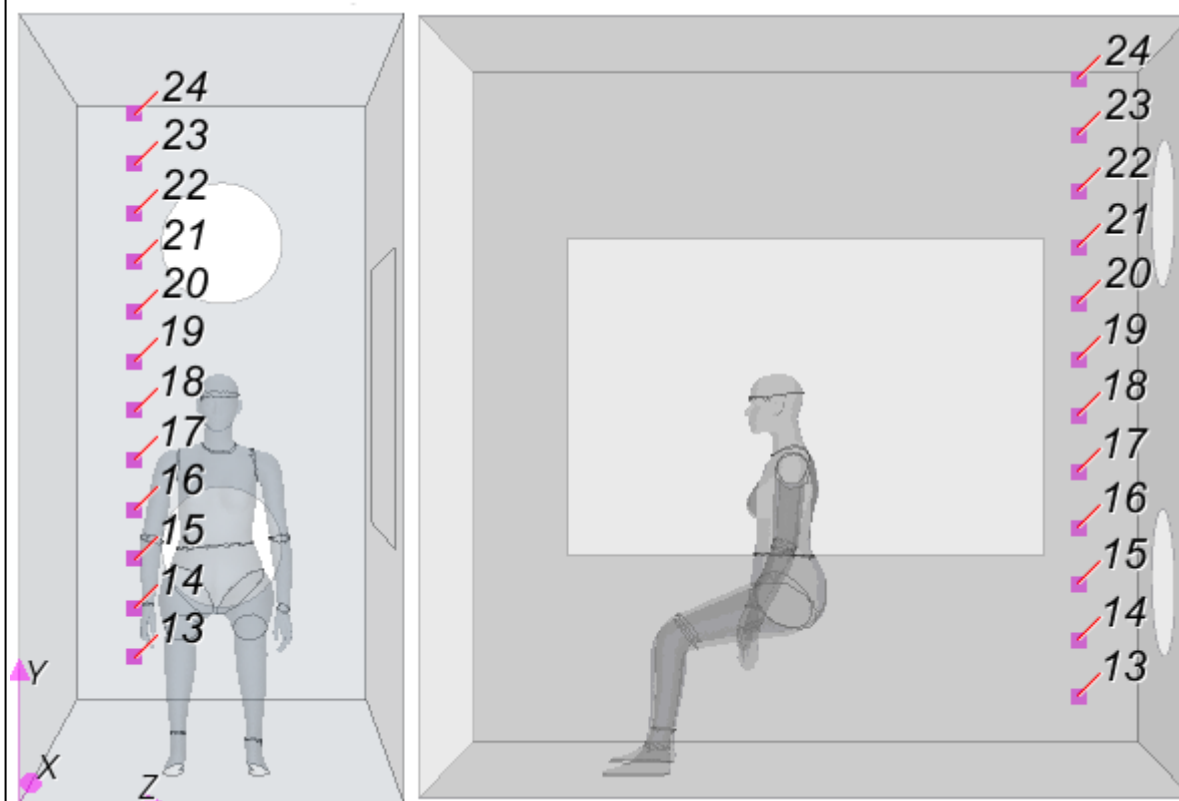
Tab.5.1: Priemerné hodnoty teplôt v diskretných bodoch (1÷12).

Meracie body	Teplota [°C]	Súradnice meracích bodov		
		x	y	z
1	19,6	1,08	0,2	0,6
2	19,8	1,08	0,4	0,6
3	20	1,08	0,6	0,6
4	20,2	1,08	0,8	0,6
5	20,4	1,08	1	0,6
6	20,4	1,08	1,2	0,6
7	20,5	1,08	1,4	0,6
8	20,5	1,08	1,6	0,6
9	20,5	1,08	1,8	0,6
10	20,5	1,08	2	0,6
11	20,5	1,08	2,2	0,6
12	20,6	1,08	2,4	0,6

Súradnica $z=0,6$ m predstavuje hodnotu polovice šírky miestnosti (šírka miestnosti $z=1,2$ m). Súradnice meracích bodov sú uvedené v metroch.

Ďalších 12 termočlánkov bolo umiestnených na pravej strane za tepelným

manekýnom vo vzdialenosti 0,25 m pred zadnou stenou s výstkami. Meracie body 13÷24 viz obr.4-5 o súradniciach viz tab.4.2 s uvedenými priemernými teplotami (hodnoty priemerných teplôt sú získané z 21 meraní).



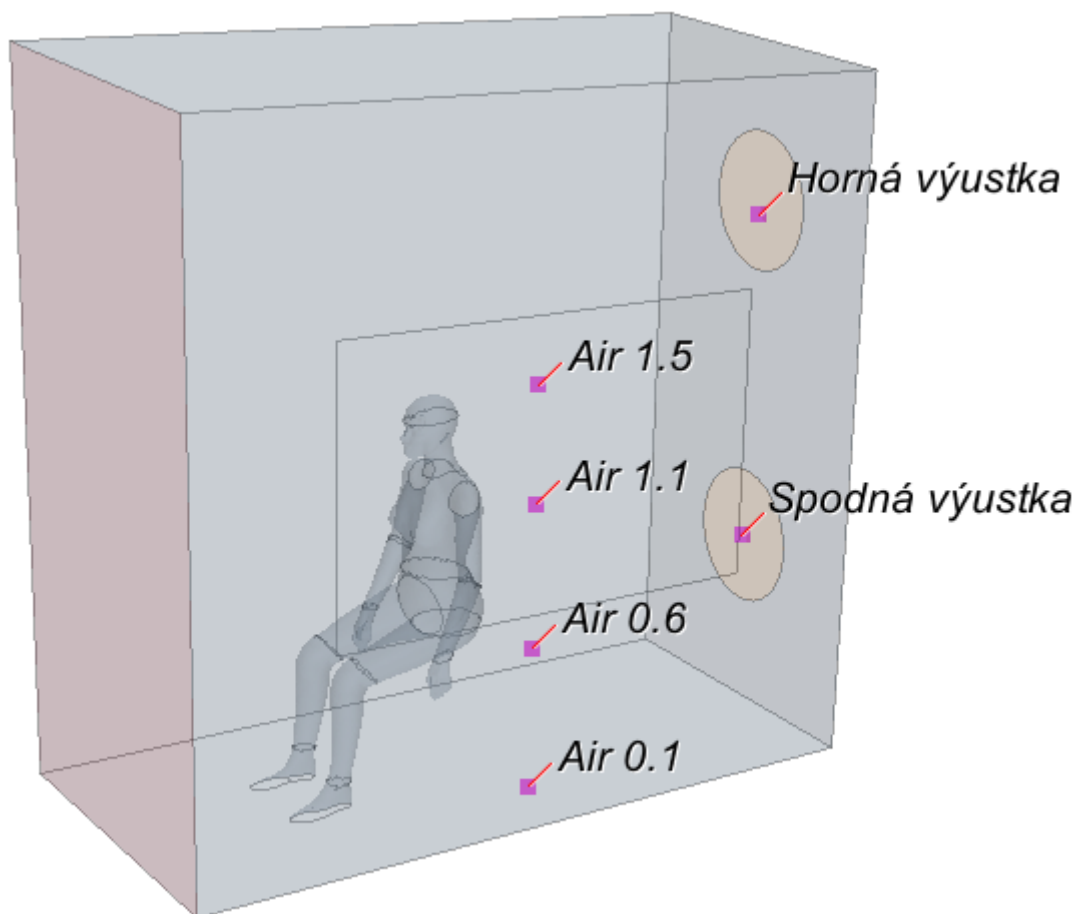
Obr.4-5: Zobrazenie umiestnenia 13 až 24 meracích bodov pred zadnou stenou.

Tab.4.2: Priemerné hodnoty teplôt v diskretných bodoch (13÷24).

Meracie body	Teplota [°C]	Súradnice meracích Bodov [m]		
		x	y	z
13	19,2	2,19	0,2	0,25
14	20,1	2,19	0,4	0,25
15	20,4	2,19	0,6	0,25
16	20,5	2,19	0,8	0,25
17	20,6	2,19	1	0,25
18	20,6	2,19	1,2	0,25
19	20,6	2,19	1,4	0,25
20	20,6	2,19	1,6	0,25
21	20,5	2,19	1,8	0,25
22	20,5	2,19	2	0,25
22	20,5	2,19	2,2	0,25
24	20,5	2,19	2,4	0,25

Grafické znázornenie teplotného profilu pred manekýnom a na pravej strane pri zadnej stene graf.1.1.

Ostatné umiestnenie štyroch termočlánkov (označenie: Air 0,1; Air 0,6; Air 1,1; Air 1,5) bolo tesne pri ľavej stene s oknom viz obr.4-6 s priemernými hodnotami teplôt viz tab.4.3. Snímala sa aj teplota viz tab.4.3 u oboch výustkách obr.4-6.



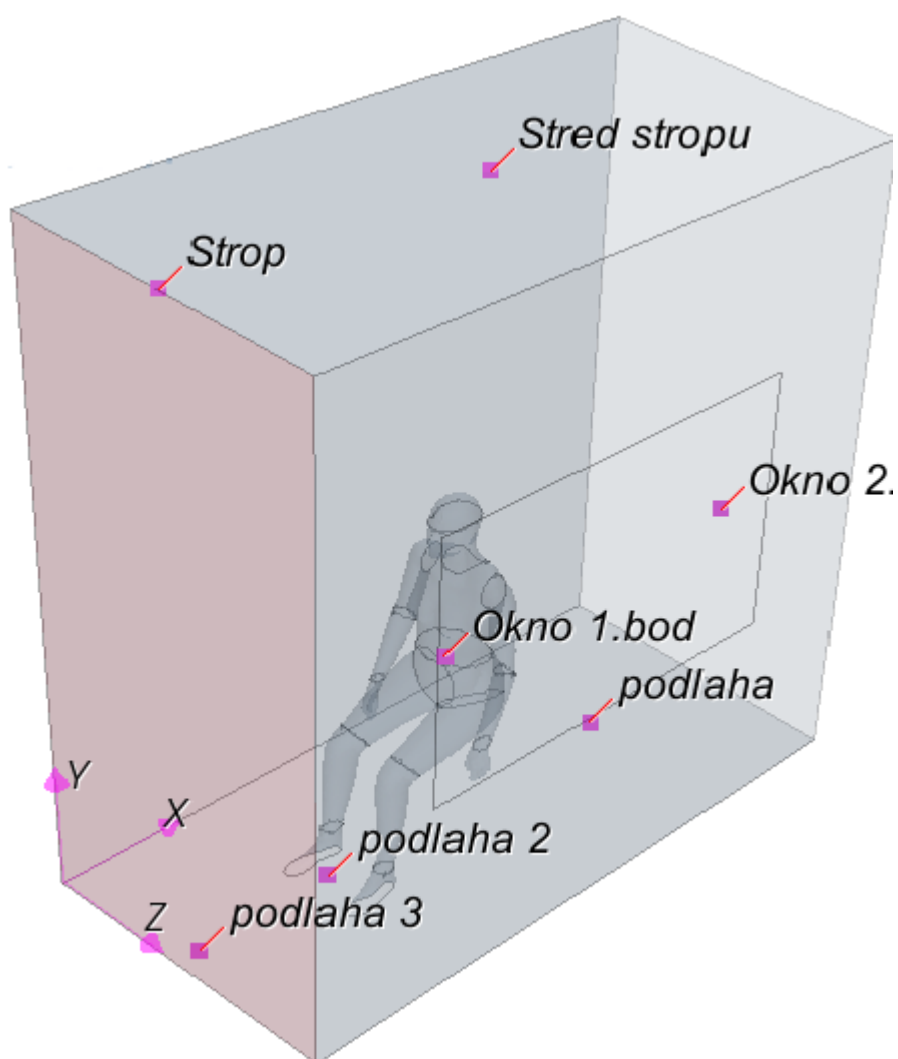
Obr.4 -6: Znáznornenie umiestnenia 4 termočlánkov pri ľavej stene a u oboch výustiek.

Tab.4.3: Priemerné hodnoty teplôt v jednotlivých bodoch.

Meracie body	Teplota [°C]	Súradnice x	meracieho y	bod u z [m]
Air 0,1	19,2	1,22	0,1	1,1
Air 0,6	20,0	1,22	0,6	1,1
Air 1,1	20,5	1,22	1,1	1,1
Air 1,5	20,6	1,22	1,5	1,1
Spodná výustka	20,2	2,44	0,63	0,6
Horná Výustka	20,6	2,44	1,84	0,6

Na podlahe sa snímali tri teploty v rôznych vzdialenostiach od čelnej steny (fialová plocha), cez ktorú, sa do miestnosti vŕhal vzduch definovanou rýchlosťou, po celom svojom priereze. Ďalšie termočlánky boli umiestnené v dvoch bodoch na okne a na strop.

Grafické znázornenie umiestnených termočlánkov na podlahe, okne a strop je uvedené na obr.4-7 a hodnotami priemerných teplôt viz tab.4.4. Tieto priemerné teploty, v diskretných bodoch, sa opäť získali z 21 meraní. Na obr.4-7 je znázornený počiatok a smer použitého kartézského súradného systému.

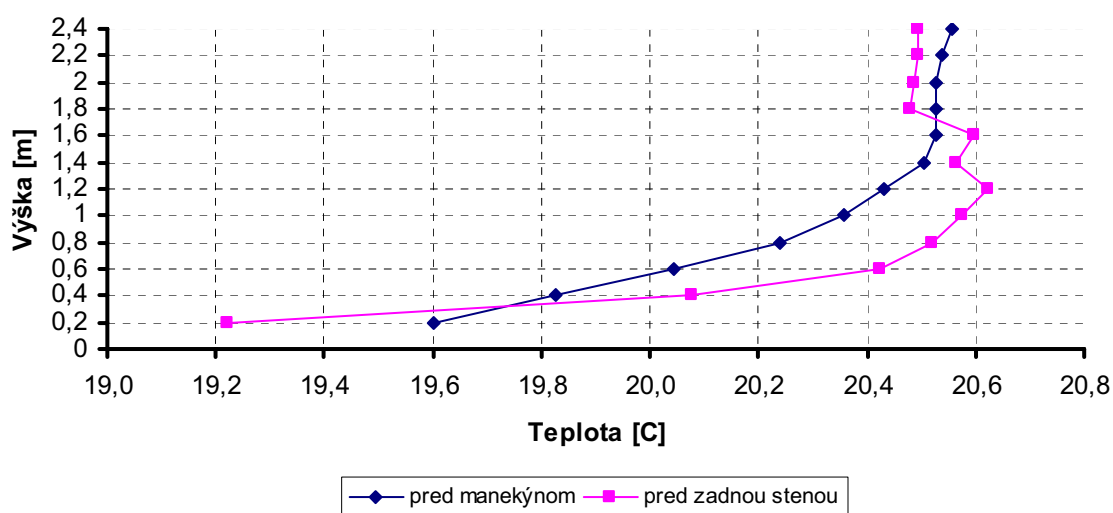


Obr.4-7: Grafické znázornenie umiestnenia termočlánkov na podlahe, okne a strop.

Tab.4.4: Priemerné teploty u podlahy, okna a stropu.

Meracie body	Teplota [°C]	Súradnice x	meracieho y	bodu [m] z
Podlaha	20,7	1,85	0	0,6
Podlaha 1	24,3	0,59	0	0,6
Podlaha 2	19,8	0,05	0	0,6
Okno 1. bod	20,9	1,85	1,23	1,2
Okno 2. bod	20,8	0,59	1,23	1,2
Strop	20,5	0,05	2,46	0,6
Stred stropu	20,7	1,22	2,46	0,6

Teplotný profil



Graf.1.1: Tepelný profil pred manekýnom a pred výustkami.

4.3.2 Meranie rýchlosti prúdenia

Tento experiment bol mimo vyššie spomínané meranie teplôt zameraný aj na vyhodnotenie prúdenia a prúdových polí v okolí manekýna, a v určených bodoch v miestnosti.

Rýchlosť prúdenia vzduchu v miestnosti bola meraná pomocou 32 kanálového anemometra Dantec Dynamics 54T21. Použitý vše smerový anemometer Dantec Dynamics 54T21, je vhodný prevažne pre meranie nízkych rýchlostí prúdenia v rozmedzí $0,05$ až $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [37].

Pri prvom meraní rýchlostí bol ženský manekýn nastavený v režime s konštantným tepelným tokom 76 W bez oblečenia, v druhom prípade mal manekýn nastavené rôzne tepelné toky na rôznych častiach tela [36].

V prvom prípade sa meranie uskutočnilo v ôsmich hladinách (výškach) vo vzdialenosti $0,19 \text{ m}$ od čelnej steny, $1,69 \text{ m}$ od čelnej steny (za manekýnom) a $0,25 \text{ m}$ pred zadnou stenou s výustkami. Uvedené hodnoty sú v použitom

súradnom systéme v smere osi x [36].

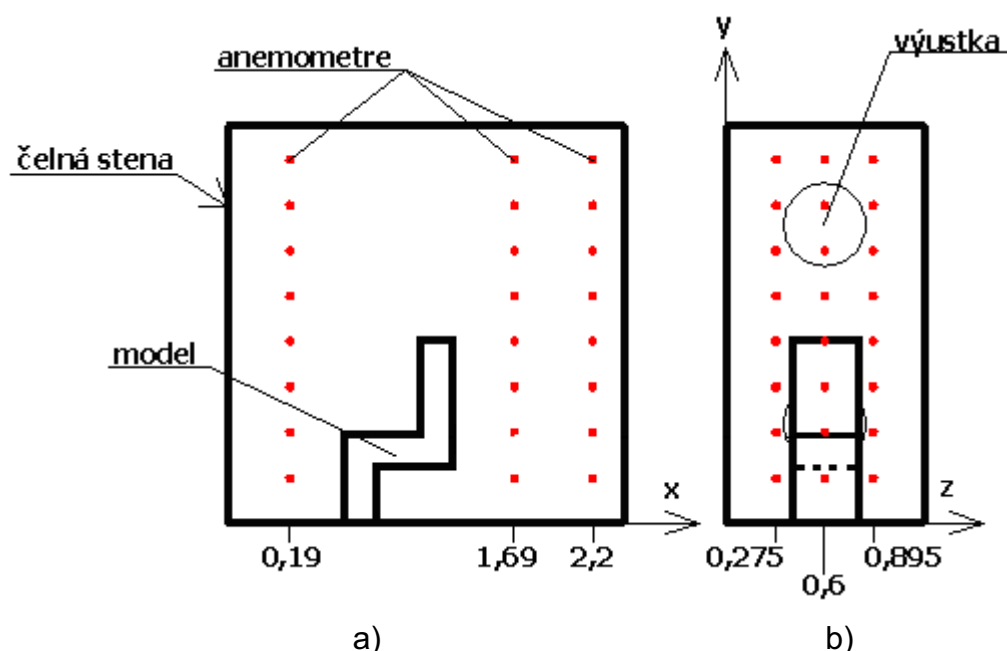
Anemometre boli nastavené v týchto výškach: 0,275 m; 0,55 m; 0,825 m; 1,1 m; 1,375 m; 0,650 m; 1,925 m a 2,2 m meraných od podlahy.

Jednotlivé meracie anemometre, v daných meracích výškach (8), boli umiestnené na stojanoch v nasledujúcich rovinách:

- po pravej strane manekýna ($z = 0,275$ m),
- v stredovej rovine manekýna ($z = 0,6$ m),
- po ľavej strane manekýna ($z = 0,895$ m).

Schematické rozloženie anemometrov v daných rovinách je znázornené na obr.4-8.

Pri meraní rýchlosti v daných bodoch, mal použitý tepelný manekýn nastavenú hodnotu tepelného toku 76 W. Namerané hodnoty rýchlostí v určených rovinách a výškach sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách tab.4.5a,b,c.



Obr.4-8: Rozmiestnenie anemetrov v klimatickej komore, a) bočný pohľad, b) pohľad spredu.

Na vyššie uvedenom obrázku obr.4-8 je v mierke zobrazená klimatická komora a tepelný manekýn. Manekýn je znázornený len schematicky, zo zachovanými hodnotami dĺžky a výšky, na dotvorenie predstavy o umiestnení pomyselných vertikálnych rovin a meracích bodov s anemometrami.

Tab.4.5a: Hodnoty rýchlostí na pravej strane manekýna.

	z= 0,275m		
x (m)	0,19	1,69	2,19
y(m)	Vel. (m/s)	Vel. (m/s)	Vel. (m/s)
0,275	0,1188	0,2247	0,2580
0,550	0,1261	0,2214	0,3419
0,825	0,1310	0,1435	0,2801
1,100	0,1415	0,2000	0,1675
1,375	0,1515	0,2511	0,1869
1,650	0,1715	0,2427	0,2966
1,925	0,1743	0,1956	0,3118
2,200	0,2321	0,1794	0,1965

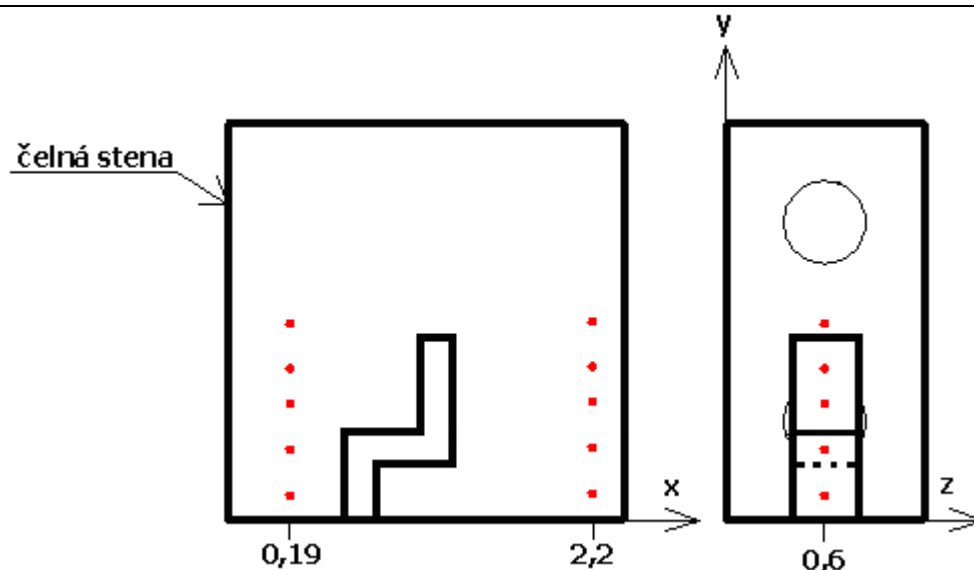
Tab.4.5b: Hodnoty rýchlostí v stredovej rovine.

	z= 0,6		
x (m)	0,19	1,69	2,19
y(m)	Vel. (m/s)	Vel. (m/s)	Vel. (m/s)
0,275	0,2898	0,2222	0,3104
0,550	0,2665	0,2109	0,5706
0,825	0,2675	0,2225	0,3905
1,100	0,2695	0,1376	0,1572
1,375	0,2768	0,2296	0,2147
1,650	0,3198	0,2709	0,4636
1,925	0,3568	0,2281	0,5743
2,200	0,3631	0,2066	0,3211

Tab.4.5c: Hodnoty rýchlostí po ľavej strane manekýna.

	z= 0,895 m		
x (m)	0,19	1,69	2,19
y(m)	Vel. (m/s)	Vel. (m/s)	Vel. (m/s)
0,275	0,4109	0,2679	0,3068
0,550	0,3808	0,2630	0,3797
0,825	0,3732	0,2352	0,3363
1,100	0,3775	0,2683	0,2340
1,375	0,3647	0,2567	0,2421
1,650	0,3701	0,2720	0,3570
1,925	0,3591	0,2515	0,3945
2,200	0,3558	0,2343	0,2711

V druhom prípade sa meranie rýchlostí uskutočnilo v piatich meracích bodoch, 0,19 m za čelnou stenou (vstupom), a v piatich meracích bodoch 0,25 m pred zadnou stenou s výstkami. Manekýn mal nastavené hodnoty tepelných tokov viz tab.4.7. Schematické znázornenie meracích bodov je na obr.4-9. Namerané hodnoty rýchlostí sú uvedené v tab.4.6.



Obr.4-9: Rozdelenie anemometrov za vstupom a pred výstkami.

Tab.4.6: Hodnoty experimentálne nameraných rýchlostí v diskretných bodoch.

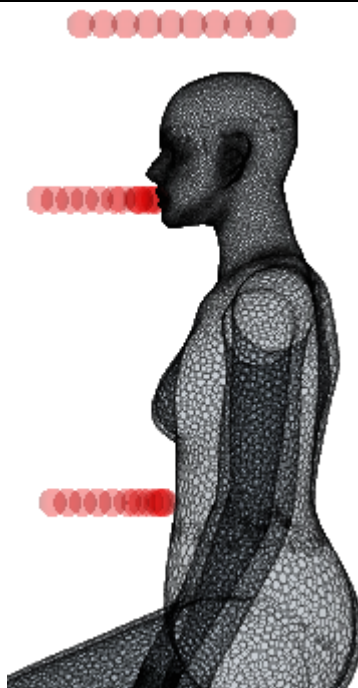
Meracie body	Rýchlosť [m/s]
1	0,292
2	0,269
3	0,254
4	0,243
5	0,278
6	0,186
7	0,228
8	0,720
9	0,982
10	0,469

Popri meraní vertikálnych rýchlostných polí, prebehlo aj meranie rýchlostí v horizontálnom smere, pomocou anemometra Dantec Dynamics 54T21.

Rýchlosti v horizontálnom profile sa merali v troch úsekoch obr.4.10:

- 1. úsek: stred tela,
- 2. úsek: v úrovni úst,
- 3. úsek: 20 cm nad hlavou manekýna.

V prvej úrovni (stred tela) prebehli merania v 13 bodoch, čo odpovedá vzdialenosti 0,15 m od tela. V druhej úrovni bola zaznamenaná oblasť približne 0,16 m od úst a bola reprezentovaná 14 meracími bodmi. Posledná oblasť 0,20 m nad hlavou manekýna, začínala na pomyselnéj tečnej s temenom a zachytávala horizontálny rýchlostný profil v dĺžke 0,27 m.



Obr.4-10: Úseky horizontálnych rýchlostných profilov.

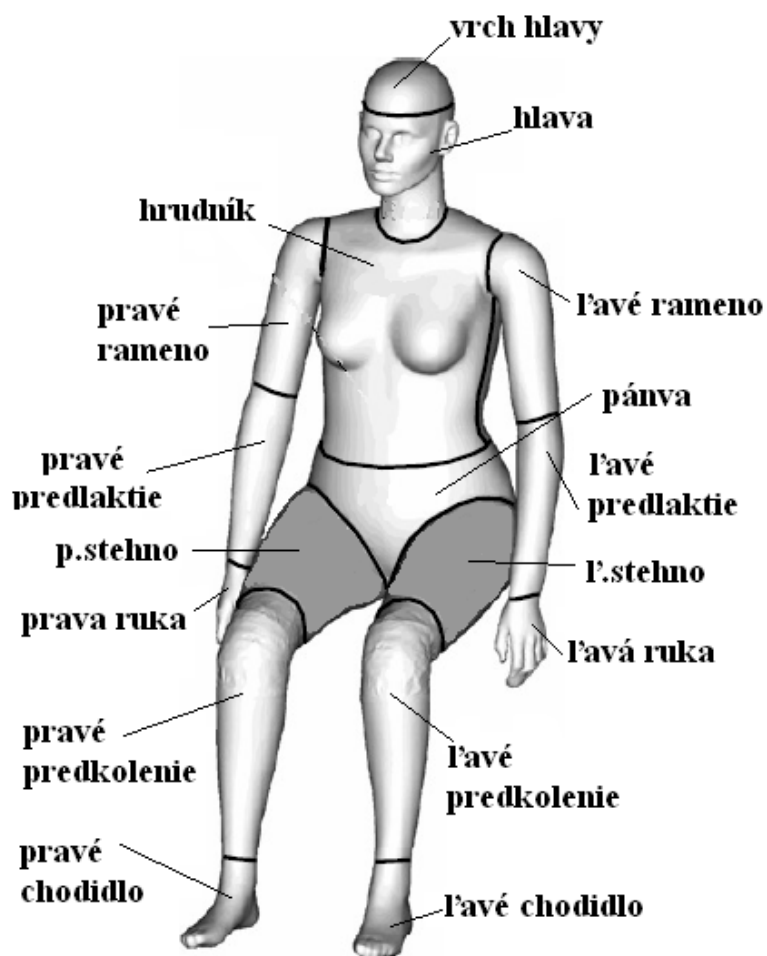
Výsledky z tohto experimentálneho merania horizontálneho profilu rýchlosti, fyzikálne výrazne neodpovedajú skutočnosti a to v každom z troch meraných úsekoch viz príloha č.2, tab.č.10. Napríklad hodnoty horizontálnych rýchlostí (nad hlavou manekýna) v uvedenom experimente vyšli záporné. Zarážajúce sú samotné hodnoty rýchlostí, ako aj pulzácie rýchlostí (hodnôt) v daných bodoch.

Na základe týchto zistení, nebudeme s týmto meraním ďalej pracovať a ani ho vyhodnocovať.

4.4 Tepelné toky

Tepelné toky na povrchu manekýna boli nastavené na dva prípady:

- 1.) Rôzny lokálny tepelný tok tab.4.7 jednotlivých častí tela viz obr.4-11.
- 2.) Tepelný tok konštantný po celom povrchu manekýna, ktorý odpovedá hodnote $\dot{q} = 46,6 \text{ W} \cdot \text{m}^2$. Plocha tepelného manekýna je $1,63 \text{ m}^2$.



Obr.4-11: Rozdelenie jednotlivých častí tela.

Tab.4.7: Tepelné toky jednotlivých častí tela.

Časť tela	Q [W/m ²]	Časť tela	Q [W/m ²]
Hlava	120,9	Ľ. ruka	164,3
Vrch hlavy	72,5	Pánva	114,8
Hrudník	118,5	Ľ. stehno	101,8
Chrbát	111,7	P. stehno	106,4
Ľ. rameno	123,7	Ľ. predkolenie	145,2
P. rameno	131,4	P. predkolenie	146,6
Ľ. predlaktie	153,1	Ľ. chodidlo	155,4
P. predlaktie	135,6	P. chodidlo	160,4
P. ruka	187,6		

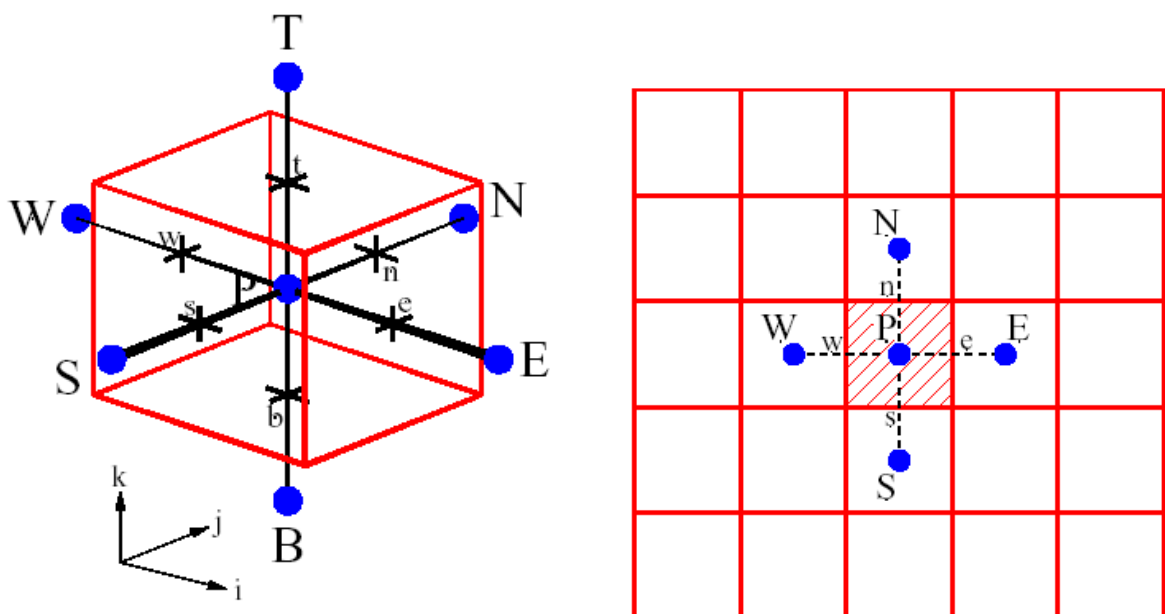
5 POČÍTAČOVÉ MODELOVANIE POMOCOU CFD

Počítačové simulačné programy (napr. STAR-CD, ANSYS, FLUENT) pracujú na metódach:

- konečných prvkov (FEA),
- konečných objemov (FVM).

Princípom uvedených metód je diskretizácia riešených parciálnych diferenciálnych rovníc. Pri ďalšom skúmaní simulačných programov sa budeme zaoberať len metódou konečných objemov (FVM), ktorá sa používa pri riešení problémov prúdenia CFD. CFD metódy sa používajú hlavne pre hydraulické (prúdenie tekutín), aerodynamické (prúdenie vzduchu) výpočty.

Metódou FVM sa skúmaná oblasť rozdelí na menšie kontrolné objemy – elementy. V strede každého objemu sa nachádza výpočtový bod P obr.5-1, ktorý reprezentuje celý kontrolný objem, zo susednými bodmi obr.5-1. Aby sme mohli previesť výpočet integrálu cez každý kontrolný objem, musíme po častiach zaviesť spojitý profil, ktorý popisuje zmenu riešenej veličiny medzi susednými sieťovými bodmi. Výsledkom je diskretizačná rovnica, ktorá predstavuje princíp zachovania riešenej veličiny pre kontrolný objem, rovnako ako diferenciálna rovnica pre nekonečne malý objem [26]. Tento matematický prístup zohľadňuje všetky fyzikálne deje, ku ktorým pri prúdení média dochádza.



Obr.5-1: Schéma lokálnej diskretizácie siete [28].

Pri modelovaní fyzikálnych dejov sa vychádza z troch základných zákonov:

- zákon zachovania hmotnosti,
- zákon zachovania hybnosti,
- zákon zachovania energie.

V rovniciach vystupujú derivácie I. a 2. rádu podľa polohy v priestore a derivácie podľa času prvého rádu. Derivácia podľa času sa objavuje v rovniciach lineárne. Ostatné derivácie vystupujú nelineárne teda v súčine s inými funkciami. Uvedené zákony vyjadruje v hydromechanike (mechanike tekutín) systém parciálnych rovníc tzv. Navier-Stokesove rovnice [26].

$$\begin{aligned}\rho \cdot \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \cdot \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \cdot \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)\end{aligned}\tag{27}$$

5.1 Postup pri riešení CFD úlohy

Medzi hlavné kroky pri CFD analýze patrí:

- základné formulovanie úlohy (vymedzenie problému)
- vytvorenie geometrického modelu a kontrolnej oblasti (použitie CAD systému)
- vytvorenie správnych okrajových a počiatočných podmienok
- nastavenie správneho fyzikálneho modelu s ohľadom na skúmaný problém
- vytvorenie a generovanie adekvátnej siete (štruktúra, veľkosť, prípadne lokálne zhustenie..)
- samotný CFD výpočet (posúdenie konvergenzie riešenia, poprípade revízia modelu, parametrov)
- spracovanie údajov pre získanie výsledkov
- porovnanie výsledkov s inými (napr. s experimentálnymi ak sú k dispozícii)
- kritické zhodnotenie dosiahnutých výsledkov

6 MODELOVANIE EXPERIMENTU POMOCOU CFD METÓD

Modelovanie prúdenia a zisťovanie určitých veličín (teplotu, rýchlosť) v klimatickej komore, s umiestneným manekýnom, bolo prevedené podľa experimentálneho usporiadania (viz. kapitola EXPERIMENT) v Dánsku a riešilo sa pomocou programu Star-CCM + verzie 4.04.011 od firmy CD Adapco.

Boli riešené a vyhodnotené nasledujúce úlohy:

- 1.) Vyhodnotenie vertikálneho profilu rýchlosti, medzi experimentom (s použitým tepelným manekýnom s tepelným výkonom 76 W) a CFD výpočtom pri rovnakých okrajových a počiatočných podmienkach.
- 2.) Vplyv rôznych lokálnych tepelných tokov a konštantného tepelného toku na rýchlostný a teplotný profil, v určených diskretných bodoch. Vyhodnocujú sa navzájom jednotlivé CFD situácie, ako aj hodnoty medzi CFD výpočtami (lokálny a konštantný tepelný tok) a experimentom.
Vyhodnotenie teplotného profilu pre jednotlivé CFD situácie (lokálne tepel.toky a konštantný tepelný tok), v porovnaní s experimentálne nameranými hodnotami.
- 3.) Vplyv veľkosti zjednodušenia geometrie tepelného manekýna na výpočet prúdenia a teplotných strát. Vyhodnotenie rýchlostného profilu sa prevádza v 3 vertikálnych rovinách za manekýnom. Teplotný profil je hodnotený v troch horizontálnych rovinách.
- 4.) Vyhodnotenie tepelných tokov s povrchu tepelného manekýna.

6.1 Tvorba podkladovej geometrie

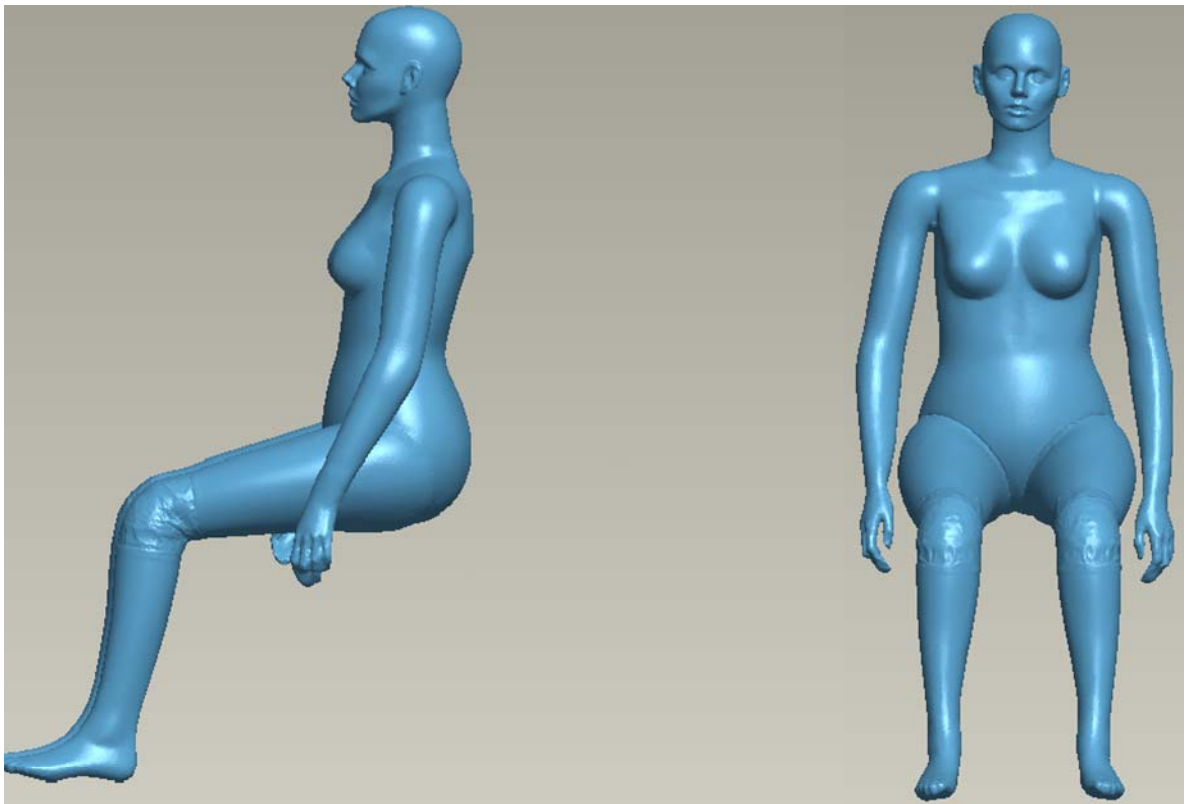
Pred začiatkom vlastného CFD výpočtu je potrebné vytvoriť geometriu (reprezentujúci objem), pomocou nejakého CAD systému a následne exportovať do vhodného výmenného formátu, ktorý podporuje daný CFD program. V reprezentujúcom objeme budú pomocou vytvoreného matematického modelu definované sústavy rovníc vhodné pre riešenie daného typu úlohy.

Tvorba podkladovej geometrie zahrňovala vytvorenie trojrozmiernej (3D) geometrie klimatickej komory s rovnakými parametrami, ako má skutočná klimatická komora vytvorená na Aalborg Univerzite v Dánsku. Geometria klimatickej komory reprezentovala výpočtový objem s ohraničenými výpočtovými oblasťami a okrajovými podmienkami.

Geometria komory obr.4-2 bola vytvorená v programe Pro/Engineer Wildfire 4.0, exportovaná do výmenného formátu *.IGES a následne importovaná do simulačného CFD programu Star-CCM+ verzie 4.04.011.

Geometrický model tepelného manekýna obr.6-1 je voľne k dispozícii k stiahnutiu na [36] a odpovedá svojimi charakteristickými rozmermi tepelnému

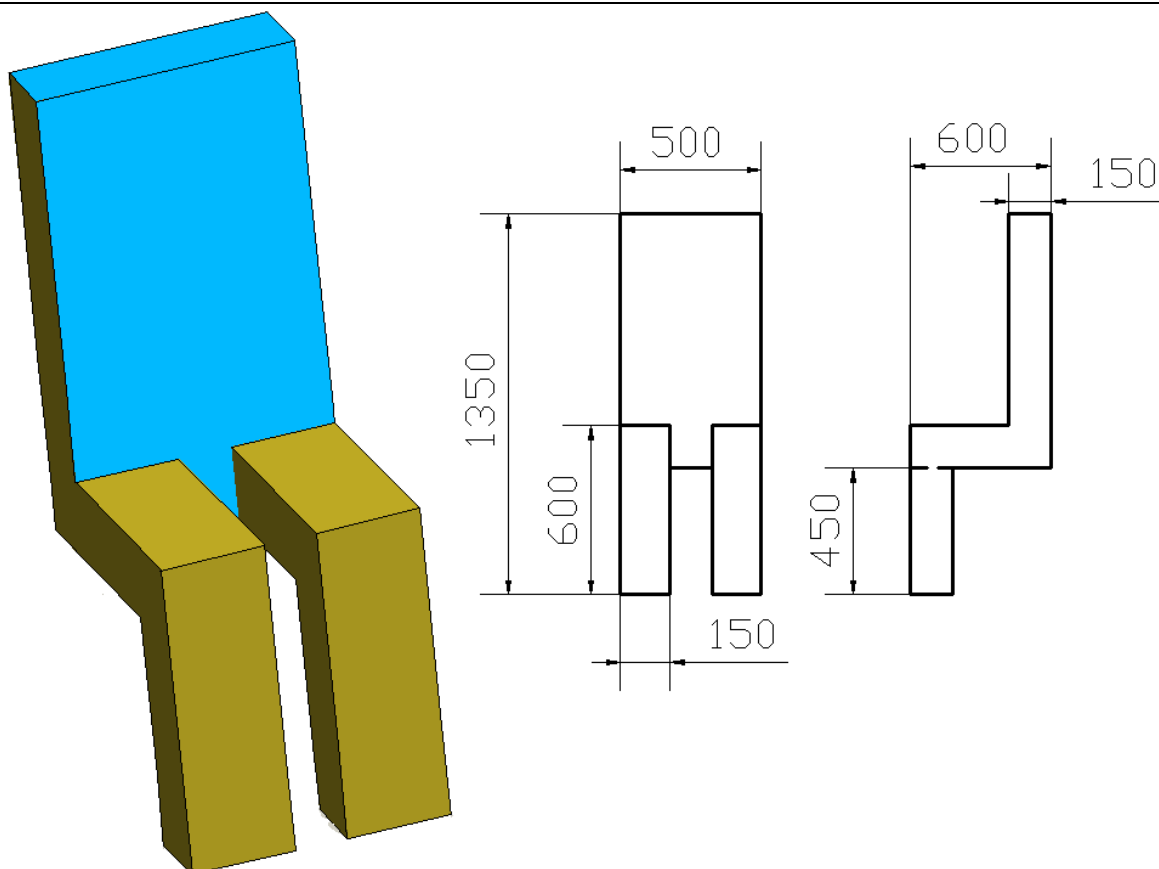
manekýnovi Comfortina (viz kapitola 4.1) od firmy PT-Teknik, ktorý bol použitý pri experimentálnej úlohe.



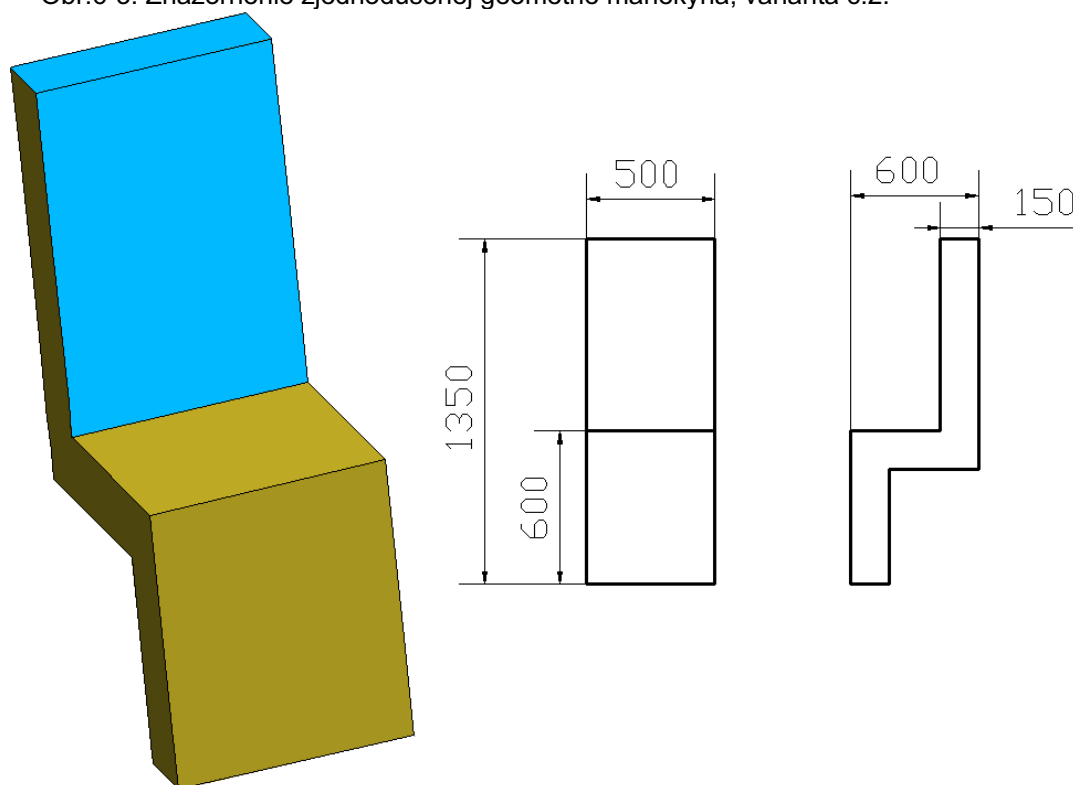
Obr.6-1: Geometrický model tepelného manekýna Comfortina.

Zjednodušená geometria tepelného manekýna bola vytvorená taktiež v programe Pro/Engineer Wildfire 4.0. Boli vytvorené dve varianty zjednodušenej geometrie. Varianta č.1 obr.6-2 pozostáva s jednotlivých geometrických útvarov (hranolov), ktoré sú istým zjednodušením tepelného manekýna. Obe varianty sa primárne skladajú s dvoch častí. Prvá časť (modré zvýraznenie), v oboch variantách predstavuje zjednodušenie trupu, hlavy a horných končatín. Druhá časť predstavuje zjednodušenie dolných končatín. Varianta č.1 predstavuje najväčšie zjednodušenie geometrie tepelného manekýna.

Varianta č.2 obr.6-3 sa líši od varianty č.1 len v druhej časti. Táto druhá časť je rozdelená na jednotlivú pravú a ľavú dolnú končatinu. Obe varianty zjednodušenej geometrie, sú uvedené aj so schematickým znázornením príslušných rozmerov.

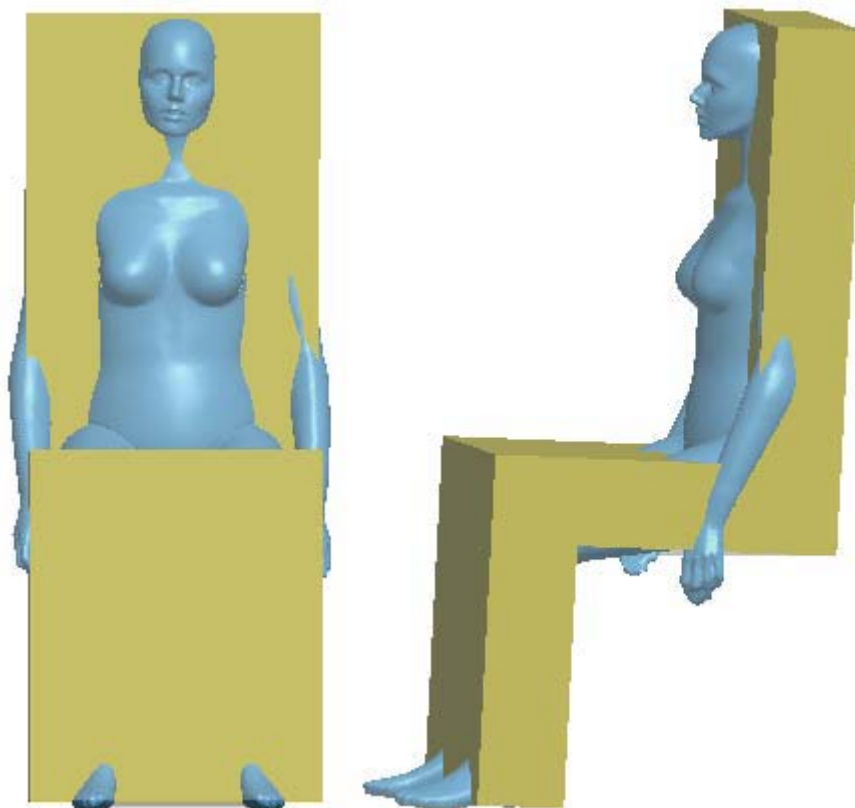


Obr.6-3: Znázornenie zjednodušenej geometrie manekýna, varianta č.2.



Obr.6-2: Zjednodušená geometria manekýna, varianta č.1.

Miera zjednodušenia geometrie tepelného manekýna je zrejmá s nasledujúceho obrázku obr.6-4. V uvedenom obrázku je vidieť, geometriu tepelného manekýna a zjednodušenú geometriu (varianta č.1).



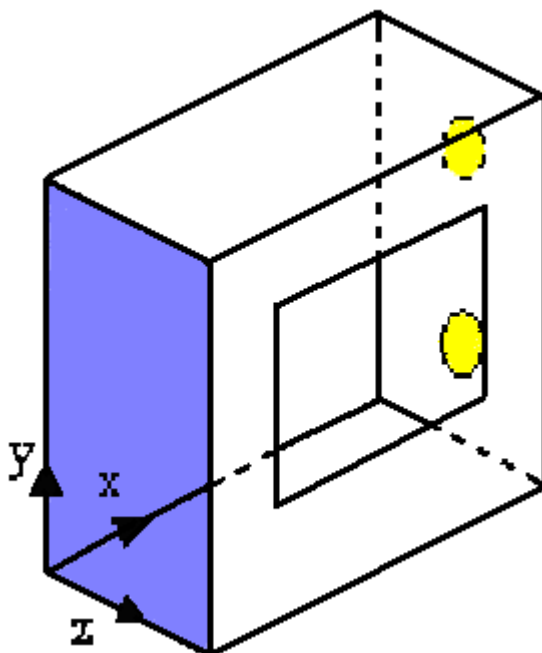
Obr.6-4: Miera zjednodušenia, zjednodušenej geometrie tepelného manekýna.

6.2 Počiatočné a okrajové podmienky pre výpočet CFD úlohy

Veľmi dôležitou časťou CFD výpočtu je vytvorenie správnej kontrolnej oblasti (v našom prípade je kontrolná oblasť celá klimatická komora), v ktorej sa jednotlivé plochy definujú okrajovou podmienkou. Okrajové podmienky musia byť zvolené fyzikálne korektne s ohľadom na predchádzajúci experiment. Nesprávnosť voľby okrajových podmienok, môže mať za následok nestabilitu matematického modelu, či divergenciu celej úlohy. Vstupné a okrajové podmienky pre CFD výpočet boli rovnaké ako pri experimentálnej úlohe. V ďalšom texte, budú prezentované, len tie najdôležitejšie.

Do vytvoreného modelu klimateckej komory sa na presne definované miesto vložil geometrický model obr.4-2 tepelného manekýna. Z čelnej steny sa po celom priereze vŕhal vzduch konštantnou rýchlosťou $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a táto stena mala nadefinovanú okrajovú podmienku VELOCITY INLET obr.6-5 - modrá plocha. Pomocou tejto okrajovej podmienky sa definuje vektor rýchlosti (hodnota rýchlosti, orientácia vektoru poprípade intenzita turbulencie atď.). Vo fyzikálnom priestore

(kontrolný objem), sa na priame riešenie diferenciálnych rovníc prúdenia najčastejšie používa kartézsky súradný systém. V našom prípade bol vektor rýchlosti vzhľadom na kartézsky súradný systém definovaný takto: $x = 0,2$; $y = 0$; $z = 0$ v metroch.



Obr.6-5: Znáznornenie súradného systému, vstupnej (modrej) a výstupnej (žltej) plochy.

Každá ďalšia stena mala (okrem 2 kruhových výustok), nadefinovanú okrajovú podmienku WALL (obr.6-5 ostatné nezvýraznené plochy), pomocou ktorej jednak vymedzíme riešenú oblasť, pri ktorej predpokladáme, že všetky zložky vektora rýchlosti sú na stene rovné nule.

Výstup vetracieho vzduchu z miestnosti sa realizoval pomocou dvoch kruhových výustok, umiestnených na zadnej časti steny (viz obr.6-5-žlté označenie). Tieto kruhové výustky mali nadefinovanú tlakovú okrajovú podmienku PRESSURE OUTLET. Teplota vzduchu a stien v klimatickej komore, bola $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nastavený atmosférický tlak vzduchu $101\,325\text{ Pa}$.

Model tepelného manekýna, mal na svojich jednotlivých plochách obr.4-11 nastavenú okrajovú podmienku *Heat transfer* (tepelný tok) s odpovedajúcou hodnotou tepelného toku viz tab.4-6.

Boli riešené dva prípady rozloženia tepelných tokov na povrchu manekýna. V prvom prípade sa jednalo o rôzne lokálne tepelné toky (viz tab.4-6) na povrchu manekýna. V druhom prípade mal celý povrch manekýna konštantnú hodnotu tepelného toku $\dot{q} = 46,6\text{ W} \cdot \text{m}^2$.

Nastavenie počiatočných a okrajových podmienok, pre model klimatickej komory, bol rovnaký aj v prípade CFD výpočtu s obidvoma variantami

zjednodušenej geometrie tepelného manekýna. Obe varianty zjednodušenej geometrie, mali nastavenú na povrchu, rovnakú hodnotu tepelného toku.

6.3 Tvorba matematického modelu

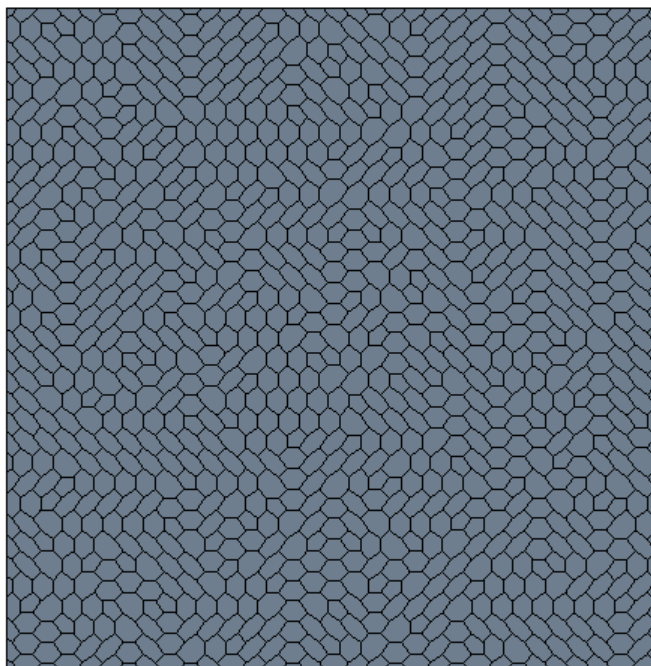
Medzi hlavné časti pri tvorbe matematického modelu patrí, voľba správnych fyzikálnych podmienok a vytvorenie vhodnej výpočtovej siete, o konečnom počte buniek. Jedná sa o takzvanú mesh – sieť. Táto výpočtová sieť diskretizuje priestor na jednotlivé časti – objemy. Počet, druh a veľkosť objemových buniek závisí na možnostiach dostupného hardwaru a v nie poslednom rade, na dosiahnutie požadovanej presnosti výpočtu. S vzrastajúcim počtom buniek, narastá výpočetný čas a nároky na hardware.

Pri riešení CFD úloh, sa výpočtovou sieťou rozumie výpočtová objemová sieť kontrolného priestoru, v ktorom nás zaujímajú sledované fyzikálne veličiny. Pre vytvorenie správnej objemovej siete je potrebné vytvoriť kvalitnú povrchovú sieť, z ktorej následne vygenerujeme objemovú sieť.

6.3.1 Voľba a nastavenie výpočtovej siete

Vzhľadom na to, že obe geometrie (geometrický model komory a tepelného manekýna) boli vytvorené samostatne, tak sa muselo pristúpiť k zjednotení oboch geometrií a tým pádom k vymedzení výpočtového objemu.

Pre správne diskretizovanie oblasti, sme v našom prípade zvolili polyhedrálnu sieť obr.6-6. Polyhedrálna sieť sa skladá z mnohostenných buniek ľubovoľného tvaru s cieľom vytvoriť jadro siete. Polyhedrálna bunka má počet hraníc v priemere 14. Pre diskretizáciu oblasti polyhedrálnou sieťou vytvoríme zhruba 5 krát menej buniek, ako pri využití štvorbokej siete, čo priaznivo ovplyvní výpočtový čas.



Obr.6-6: Ukážka povrchovej polyhedrálnej siete.

Výhodou toho typu siete, je možnosť znižovať alebo zvyšovať hustotu buniek siete, pomocou kontrolného objemového faktoru a tzv. rastového faktoru. V našom prípade sme ponechali objemový a rastový faktor vo východnom nastavení rovný 1. Pre presnejšiu diskretizáciu dôležitých oblastí, sme vyriešili lokálnym zhustením siete, o ktorom bude zmienka neskôr.

Pri nastavovaní výpočtovej siete u zložitejších modelov geometrie, môže nastať problém s entitami. Entity sú veľmi malé prvky a pri styku týchto prvkov pod malým uhlom, môžu spôsobiť degeneráciu siete. Stáva sa to prevažne v miestach s problematickými prechodmi, alebo pri styku jednotlivých geometrií, ktoré majú medzi sebou veľmi malé vzdialenosti. Spomínané prvky majú na stabilitu a korektnosť výpočtu negatívny vplyv.

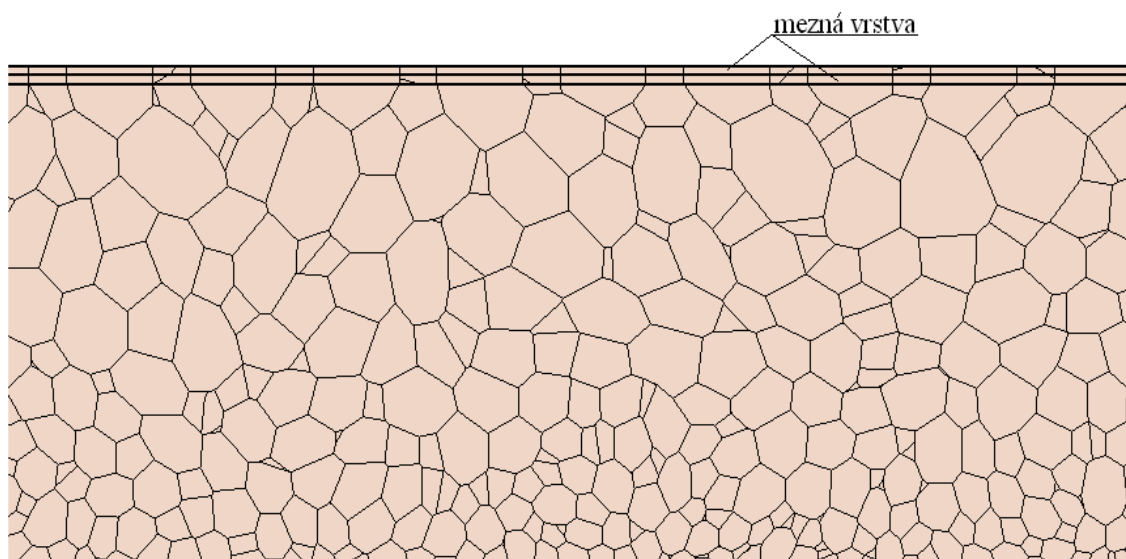
Pri našom vytváraní siete sa vyskytli dva tieto problémy, ktoré sa vyriešili buď vhodnou úpravou importovanej geometrie, alebo zmenou v nastavení minimálnej veľkosti bunky v danej oblasti.

Jednalo sa o problematickú stykovú plochu, medzi chodidlom manekýna a podlahou v klimatickej komore. V dostupných informáciách o experimente bolo uvedené, neuvažovanie tepelného toku s chodidla do podlahy. Na základe tejto skutočnosti, sme chodidlá tepelného manekýna (u zjednodušených geometriách sa jedná o odpovedajúce časti) vnorili do podlahy, čím sme docielili zjednotenie geometrie bez nebezpečných prechodov.

Pri vlastnom nastavovaní výpočtového modelu siete sme zvolili *Surface remesher*, ktorý sa používa k re – triangulácii stávajúceho povrchu, s cieľom zlepšiť

celkovú kvalitu povrchovej siete a optimalizovať ju pre vytvorenie objemovej siete.

Pri ďalšom nastavovaní modelu siete sme zvolili *Model prism layer mesher*. Tento typ modelu umožňuje vytvoriť prizmatické (hranolové) bunky, ktoré vymedzujú stenové podmienky v objemovej sieti. Tieto prizmatické bunky sú potrebné pre simuláciu turbulencie a prenosu tepla. Hrúbka, počet vrstiev a rozloženie prizmatických buniek (vrstiev) siete je primárne určená použitým turbulentným modelom. Pre modely používajúce stenové funkcie sa používajú jedna až tri vrstvy. V našom prípade bol zvolený počet prizmatických vrstiev 2 obr. 6-7, ktoré sa nachádzali na vnútornej stene modelu klimatickej komory.



Obr.6-7: Znáozornenie medznej vrstvy v reze klimatickej komory.

Základnú veľkosť bunky sme zvolili 0,1 m a jej veľkosť vzhľadom na rozmery miestnosti (1,2 x 2,44 x 2,46m) je dostatočná.

Jednou z ďalších funkcií, ktorá pomáha pri tvorbe kvalitnej siete, bola zvolená funkcia *Automatic surface repair* (automatická oprava povrchu). Táto funkcia umožňuje automatickú opravu geometrických chýb na povrchu, ktoré mohli vzniknúť pri opakovanom vytvorení siete. V jej základnom nastavení sme použili dva rôzne ukazatele *surface proximity* (blízkosť plôch) a *surface quality* (kvalita plochy).

Ukazateľ *surface proximity* umožňuje nastaviť napr. minimálnu blízkosť uzlov povrchovej siete. Táto nastavená hodnota (v našom prípade 0,05) vzdialenosti platí pre všetky susedné povrchy. Hodnota je definovaná ako priemerná percentuálna dĺžka hrán trojuholníka kontrolovanej bunky.

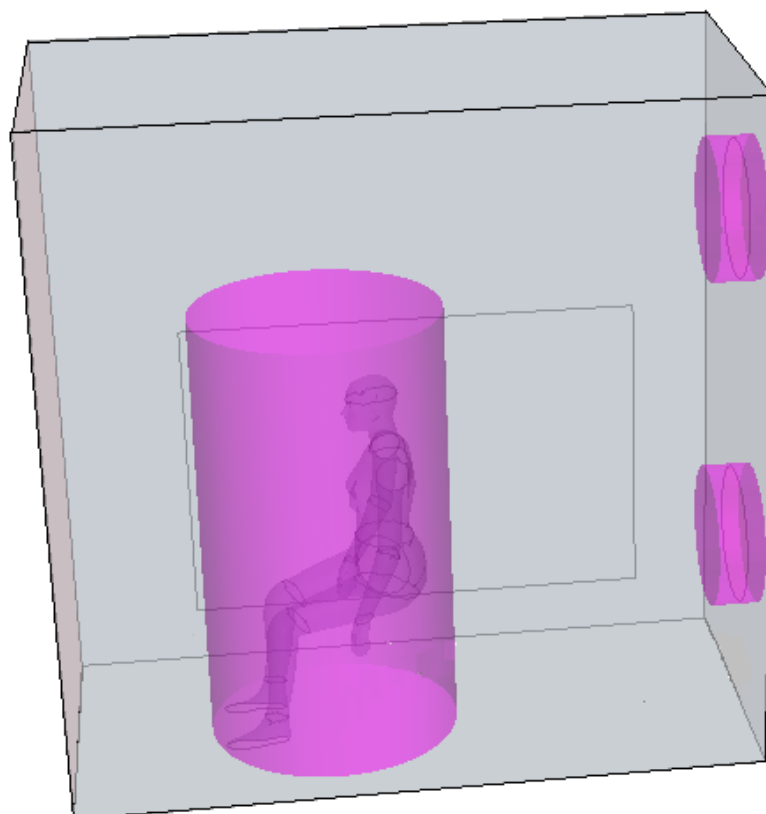
Ukazateľ *surface quality* zaistí, že vytvorené trojuholníky budú mať kvalitu rovnakú, alebo vyššiu ako zadaná hodnota. Táto kvalita sa dosahuje tým, že mesher v prípade potreby presunuje prečnievajúce uzly za účelom odstránenia, alebo zlepšenia kvality plochy, ktorej kvalita je horšia ako zadaná hodnota. V našom prípade sme hodnotu ukazateľa *surface quality* sme nechali vo východzej hodnote

0,01. Doporučené hodnoty sú v rozmedzí 0,01 až 0,1. Výpis základného nastavenia použitej výpočtovej siete je uvedený v tab.6.1.

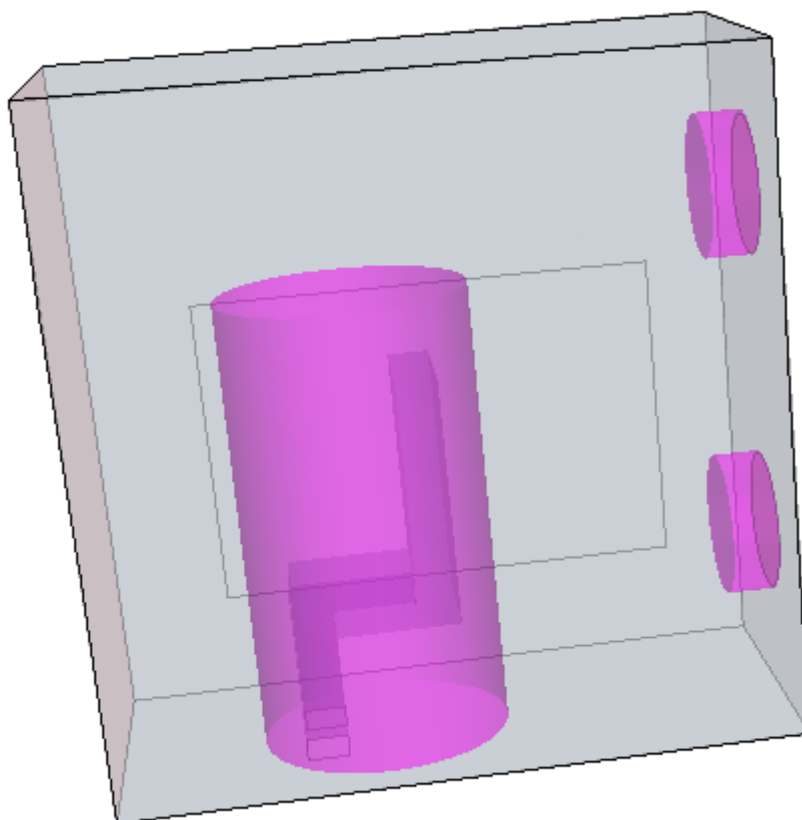
Tab.6.1: Výpis hlavného nastavenia základnej siete.

Model siete	Referenčná hodnota		Automatická opava siete	
Surface remesher	Základná veľkosť bunky:	0,1m	Minimálna vzdialenosť uzlov:	0,05
Polyhedral mesher	Veľkosť plochy bunky		Minimálna kvalita buniek:	0,01
Prism layer mesher	Absolútna veľkosť:	0,025m	Počet prizmatických vrstiev:	2
	Počet buniek celkovo:	852 370	Abslut.hrúbka prizmat.vrstiev:	0,02m

V modelu klimatickej komory s umiestneným tepelným manekýnom obr. 6-8 a zo zjednodušenej geometriou (pre obe varianty) tepelného manekýna obr.6-9, sme vytvorili tri zhustené objemové výpočtové oblasti. Zhustená objemová oblasť bola vytvorená valcom o polomere 0,45 m (v okolí geometrického modelu) a valcami o polomere 0,26 m v okolí dolnej a hornej výustky.

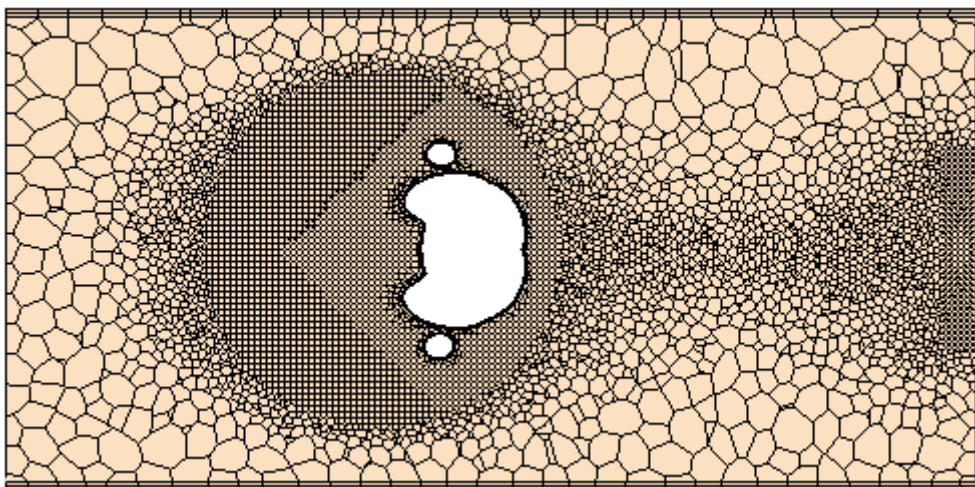


Obr.6-8: Zobrazenie objemových zhustení v situácii s tepelným manekýnom.



Obr.6-9: Zobrazenie objemových zhustení v situácii zo zjednodušenou geometriou.

Zhustená výpočtová oblasť, je to presne definovaná oblasť, ktorá umožňuje zvýšiť objemovú hustotu buniek siete, čím dosiahneme presnejšieho výpočtu vo vymedzenej oblasti. Na obr.6-10 je v reze znázornené lokálne zhustenie siete okolo tepelného manekýna a dolnej výustky. Na tomto obrázku (obr.4) je vidieť medznú vrstvu po vnútornom obvode stien klimatickej komory, na ktorých bola aplikovaná okrajová podmienka WALL.



Obr.6-10: Znázornenie lokálneho zhustenia siete v pozdĺžnom reze komory.

Výhodou týchto objemových zhustení je tá, že nemusíme zhusťovať (spresňovať) celý výpočtový objem, ale sústredíme sa len na oblasti, ktoré nás najviac zaujímajú z hľadiska vlastného riešenia. Ďalšou výhodou použitia týchto oblastí je, že nám príliš nevzrastá počet buniek vo výpočtovom objeme, čo sa priaznivo odrazí na výpočtovom čase a na možnostiach použitého hardwaru. Nastavenie jednotlivých objemových oblastí je uvedený v tab.6.2.

Tab.6.2: Základné nastavenie objemových zhustení, pre jednotlivé oblasti.

Tepelný manekýn a zjednodušená geometria

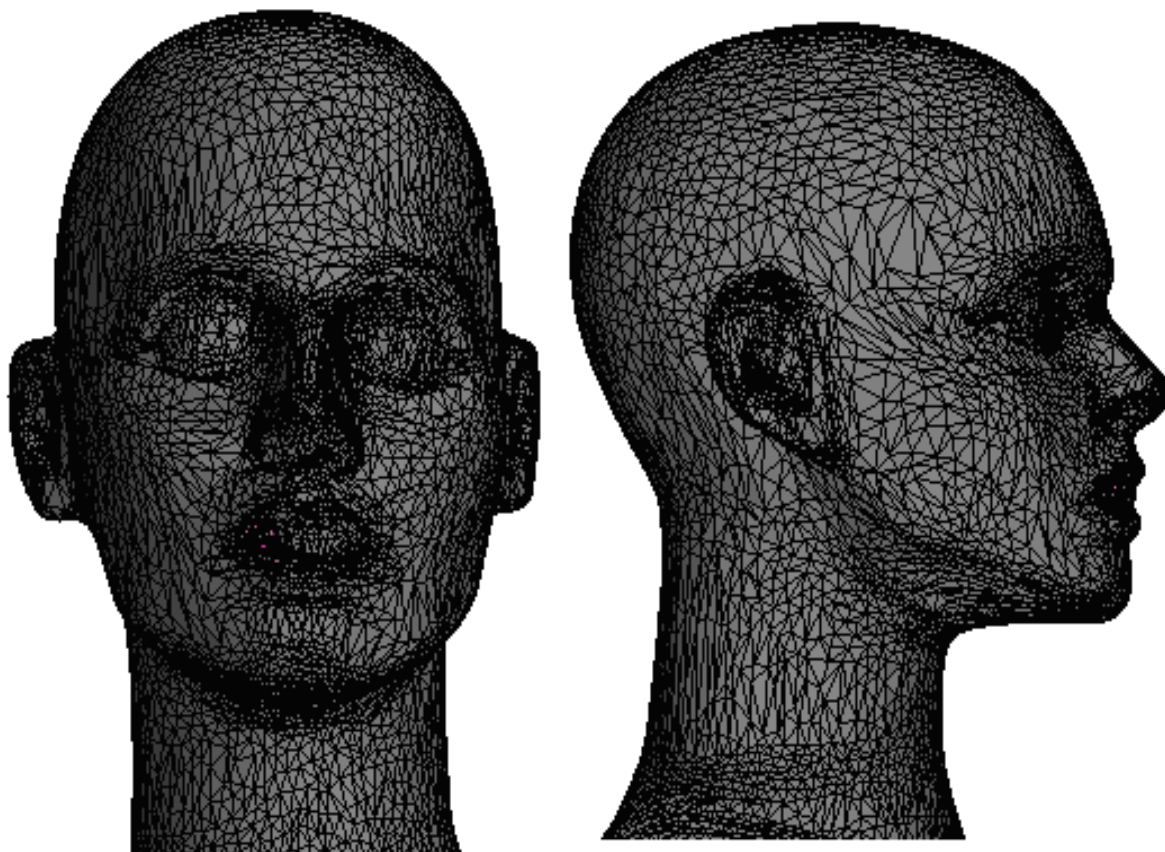
Model siete	Hodnoty bunky	
Surface remesher	Absolútna veľkosť buniek:	0,015m
Polyhedral mesher	Počet prizmatických vrstiev:	2
Prism layer mesher	Absolut.hrúbka prizmat.vrstiev:	0,006m

Dolná a horná výustka

Model siete	Hodnoty bunky	
Surface remesher	Absolútna veľkosť buniek:	0,015m
Polyhedral mesher	Počet prizmatických vrstiev:	2
Prism layer mesher	Absolut.hrúbka prizmat.vrstiev:	0,015m

Pri ďalšom nastavovaní výpočtovej siete, bolo vhodné upraviť ešte na jednotlivých častiach tepelného manekýna hustotu siete. Nastaviť minimálnu veľkosť bunky bolo potrebné hlavne na niektorých geometricky zložitejších častiach tela - na rukách. Pri zachovaní pôvodnej veľkosti bunky dochádzalo na týchto miestach (hlavne medzi prstami) k nežiadúcej výraznej deformácii modelu a výpočtovej siete.

Jednotlivé časti tela (okrem rúk) tepelného manekýna, mali nastavenú minimálnu 15 % (0,015 m) hodnotu veľkosti bunky, zo základnej veľkosti bunky (0,1 m). Minimálna veľkosť bunky siete na rukách, bola nastavená na 12 % (0,012 m) zo základnej veľkosti bunky. Tieto zmenené hodnoty veľkostí buniek, sa zdajú byť dostatočné pre použitie v našom ďalšom výpočte. Znázornenie vytvorenej povrchovej siete na modely hlavy je na obr.6-11.



Obr.6-11: STL sieť na hlave tepelného manekýna.

6.3.2 Voľba fyzikálneho modelu

Základným predpokladom na dosiahnutie reálnych výsledkov, je nastavenie správneho fyzikálneho modelu. Pri voľbe fyzikálneho modelu, sa snažíme doceliť čo možno najpresnejšieho matematického popisu skúmaného problému.

Pre všetky typy geometrií (model tepelného manekýna, obe zjednodušené geometrie), sme použili rovnaký fyzikálny model a počiatočné podmienky viz. kapitola 7.2.

Vlastný CFD výpočet sme riešili ako troj-dimenzionálnu (3D), časovo ustálenú úlohu. Istým zjednodušením pri voľbe fyzikálneho modelu, bolo prúdiace médium. Ako prúdiace médium sme zvolili ideálny plyn, pri ktorom zanedbávame vzájomné silové pôsobenie častíc a objem molekúl.

Model ideálneho plynu sa bežne používa pre výpočty prúdenia vzduchu, pri normálnych teplotách a tlakoch.

V ďalšom kroku sme stanovili CFD riešič, podľa ktorého sa budú počítať príslušné diferenciálne rovnice. Zvolili sme model *Segregated Flow* (oddelený riešič prúdenia), ktorý zvlášť rieši rýchlostné a tlakové rovnice. Tento riešič je vhodný použiť predovšetkým pri konštantnej hustote prúdenia. Umožňuje však riešiť

prenos tepla prirodzenou konvekciou, aj pri mierne stlačiteľnom prúdení s nízkou hodnotou Raleighova čísla [29].

Ďalším zvoleným fyzikálnym modelom, pre riešenie rovníc energií, bol *Segregated Fluid Temperature*, ktorý rieši celkovú energetickú rovnicu s teplotou ako nezávisle premennú. Pri tomto type úlohy za daných podmienok, bolo potrebné myslieť na turbulentné prúdenie a teda navrhnúť vhodný turbulentný model.

Pre matematický popis turbulencie sme použili RANS (Reynolds Avaraged Navier-Stokes) model. RANS model definuje Reynoldsové napätia na základe priemerovaných veličín. Zložky okamžitej rýchlosti prúdenia, sú rozložiteľné na stredné (priemerované) rýchlosti a na zložku dynamických turbulentných fluktuácií. Reynoldsové napätia v princípe zahŕňujú priebeh turbulentných fluktuácií v danom časovom intervale [33]. Reynoldsové napätia sa správajú rovnako ako napätia v kvapaline. Tento turbulentný RANS model definuje turbulentnú viskozitu [32].

Turbulentný model sme SST (Menter) $k-\omega$, ktorého silnou stránkou je schopnosť správne predvídať prúdenie v medzných vrstvách, rovnako ako vo voľných trecích vrstvách. Je to dvoj rovnicový model, ktorý je alternatívou k modelu $k-\epsilon$ [38]. Tento model sa snaží spojiť to lepšie z $k-\omega$ modelu (tj. presnosť predikcie v blízkosti stien) zo silnými stránkami modelu $k-\epsilon$ (tj. nezávislosť vplyvu stien v jadre prúdu. Dosahuje toho tým, že oba modely ($k-\omega$ a $k-\epsilon$) prevádza do rovnakej formulácie ($k-\omega$), a pomocou zmiešavacej (prepínacej) funkcie aktivuje v medzných vrstvách model $k-\omega$ a ďalej od stien postupne prepína na model $k-\epsilon$ [34].

7 ANALÝZA A INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV

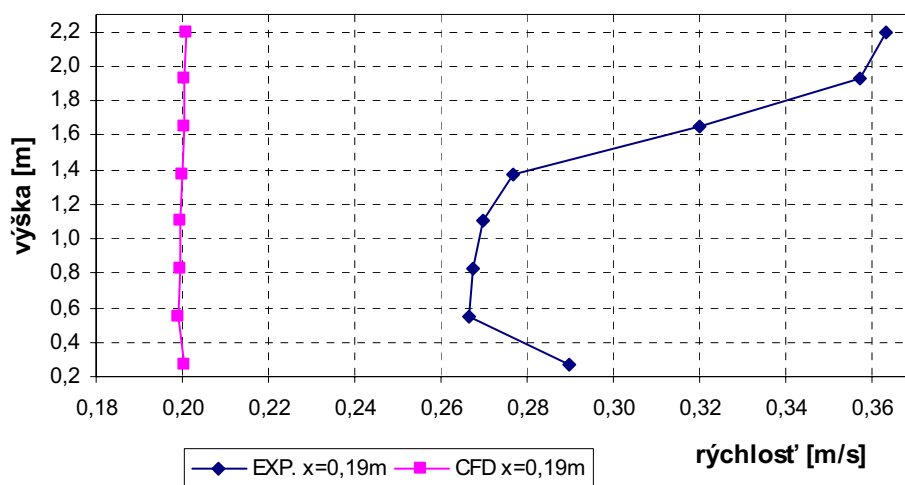
7.1 Vyhodnotenie č.1

Vyhodnotenie číslo 1 spočívalo v analýze vertikálneho profilu rýchlosti, medzi experimentálnymi hodnotami a CFD výpočtom. Pri experimentálnej úlohe mal tepelný manekýn nastavený tepelný výkon na 76 W, čo odpovedá 1 metabolizmu (človek vo fyzickom klude, napr. v sede).

Vlastný CFD výpočet bol vykonaný pri rovnakých okrajových a počiatočných podmienkach, ktoré odpovedali podmienkam pri experimentálnom meraní viz kapitola 4.

Meranie sa uskutočnilo v troch vertikálnych rovinách a v troch vzdialenostiach od čelnej steny (0,19m; 1,69 m; 2,19 m) obr.4-8.

Grafické znázornenia rýchlostných profilov pre vzdialenosti $x = 0,19$ m, $x = 1,69$ m a $x = 2,19$ m v stredovej rovine ($z = 0,6$ m), sú zobrazené v nasledujúcich grafoch graf 7.1 až graf 7.3 s vyhodnotením. Ostatné grafy rýchlostných profilov pre ľavú a pravú stranu sú uvedené v prílohe č.1, graf č.3 až graf č.6.



Graf 7.1: Vertikálny rýchlostný profil, 0,19 m od čelnej steny.

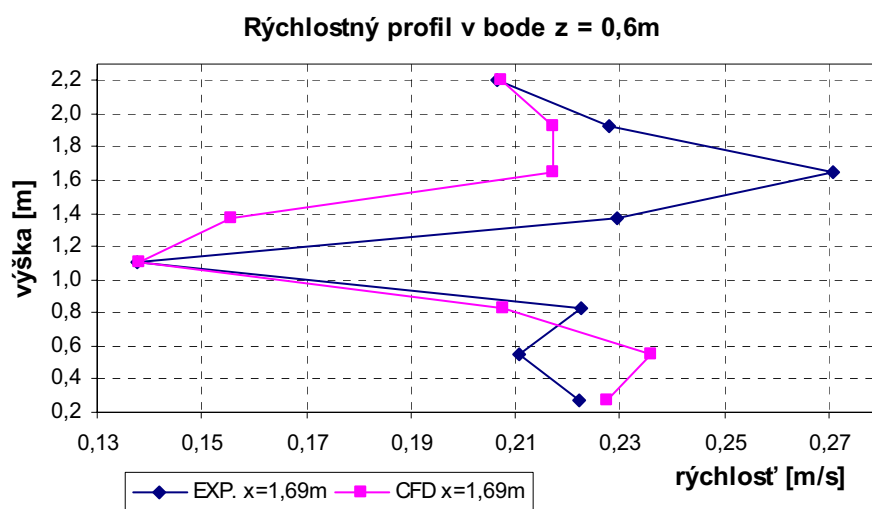
Pri porovnávaní vertikálneho rýchlostného profilu (graf 7.1) medzi nameranými experimentálnymi hodnotami a hodnotami získanými vlastným CFD výpočtom bolo zistené, že vstupná rýchlosť prúdenia nebola konštantná po celom priereze čelnej steny.

Uvedený graf je zkonštruovaný pre vzdialenosť 0,19 m od čelnej steny, v polovičnej šírke klíma komory ($z = 0,6$ m). Vo vzdialenosti 0,19 m sa predpokladá ešte neovplyvnený (napr. geometriou, alebo teplotou) konštantný rýchlostný profil. Pri splnení podmienky konštantnej rýchlosti prúdenia (viz kapitola 4) není možné na

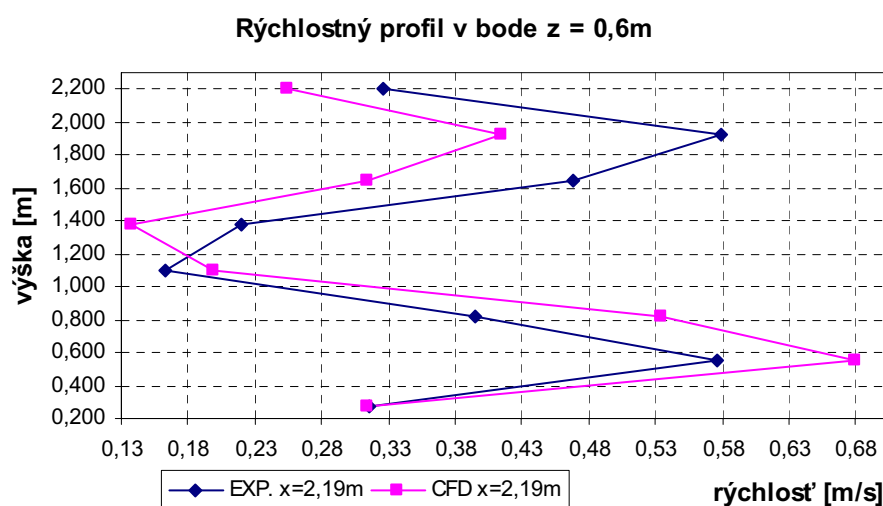
tak krátkom a voľnom úseku (0,19 m) od vstupu dosiahnuť rýchlosť prúdenia dokonca nad 0,36 m/s.

Táto dosiahnutá nerovnomernosť rýchlostného profilu pri experimentálnej úlohe mohla byť spôsobená napr. rýchlostnými a tlakovými stratami pri vedení vzduchu v nerovnomernom prívodnom potrubí, alebo aj v použití nevhodného koncového prvku, alebo zdroja vzduchu.

Z dôvodu zrejmého nedodržania vstupnej podmienky konštantného rýchlostného profilu a rýchlosti sa pri experimentálnom nastavení vyšetrovanej úlohy ďalej nebudeme v práci zaoberať rýchlostnými profilmi na pravej ($z = 0,25$ m) ani ľavej strane ($z = 0,895$ m) klimatickej komory vo vzdialenosti 0,19 m od čelnej steny. Grafické znázornenie uvedených profilov sú umiestnené v prílohe č.1, grafy č.1 a č.2.



Graf 7.2: Vertikálny rýchlostný profil v strede klimatickej komory, 1,69 m od čelnej steny.



Graf 7.3: Vertikálny rýchlostný profil v strede klimatickej komory, 2,19 m od čelnej steny.

Profil rýchlosti pre graf 7.2 a graf 7.3 má pre obe krivky (experiment, CFD

výpočet) zvlnený charakter. Tento zvlnený charakter rýchlosti je spôsobený geometrickým tvarom manekýna a jeho tvarovým odporom. Grafy 7.2 a 7.3 sú vytvorené v stredovej rovine manekýna ($z = 0,6$ m) v rôznych vzdialenostiach za geometriou ($x = 1,69$ m, $x = 2,19$ m). Pri prúde vzduchu v oblasti dolných končatín (cca $0,6$ m nad zemou) nedochádza vplyvom voľného priestoru medzi nohami k obmedzovaniu a zabrzďovaniu prúdu (graf 7.2). Vzduch takmer voľne prúdi v oblasti medzi nohami sediaceho manekýna. Pri ďalšom skúmaní rýchlostného profilu zisťujeme, že vo výške $1,1$ m od podlahy dochádza k výraznému poklesu rýchlosti, ktoré je spôsobené obtekaním vzduchu okolo trupu manekýna. Pri obtekaní vzduchu okolo geometrie dochádza k zníženiu rýchlosti v dôsledku trenia molekúl vzduchu o povrch geometrie.

Vo výške približne $1,4$ m už nedochádza k ovplyvneniu vertikálneho prúdenia geometriou (výška sediaceho manekýna je cca $1,34$ m). Rýchlosť je v porovnaní s rýchlosťou v okolí trupu ($0,4$ m za manekýnom) vyššia a vzduch sa voľne šíri do priestoru. Rýchlosť vo vyšetrovanej vzdialenosti ($x = 1,69$ m) ešte nie je výrazne ovplyvnená zadnou stenou s výstkami.

Graf 7.3 znázorňuje rýchlostný profil v blízkosti zadnej steny s výstkami. Charaktery rýchlostných profilov sú pre obe krivky (experiment, CFD výpočet) takmer zhodné. Vo výške $0,6$ m nad podlahou dochádza k výraznému ovplyvneniu rýchlosti prúdenia výstkou. Toto výrazné zvýšenie rýchlosti je spôsobené odvádzaním vzduchu a strhávaním prúdu cez spodnú výstku. Pri odvádzaní vzduchu výstkou sa znižuje tlak a zvyšuje sa rýchlosť prúdenia. Os spodnej výstky priemeru $0,25$ m je $0,6$ m nad podlahou. Vo výške okolo $1,1$ m až $1,4$ m pretrváva vplyv geometrie manekýna na poklese rýchlosti (obdobne ako v predchádzajúcom vyhodnotení grafu 7.2). Následný nárast rýchlosti (vo výške nad $1,4$ m) je spôsobený zvyšujúcim sa vplyvom výstky.

Krivka rýchlostného profilu v oboch grafoch pre experimentálnu úlohu vykazuje mierne odchylky vo veľkosti absolútnych hodnôt rýchlostí v porovnaní s CFD výpočtom z možného dôvodu uvedeného vo vyhodnotení grafu 7.1.

Zhrnutie: Vyhodnocovali sme vertikálny rýchlostný profil medzi tepelným manekýnom a experimentom. Zistili sme, že pri experimentálnom meraní nedodržali deklarovaný konštantný rýchlostný profil prúdenia vzduchu na vstupe a ani definovanú rýchlosť prúdenia. Naopak, pomocou CFD výpočtu sa nám podarilo dodržať definované počiatočné podmienky.

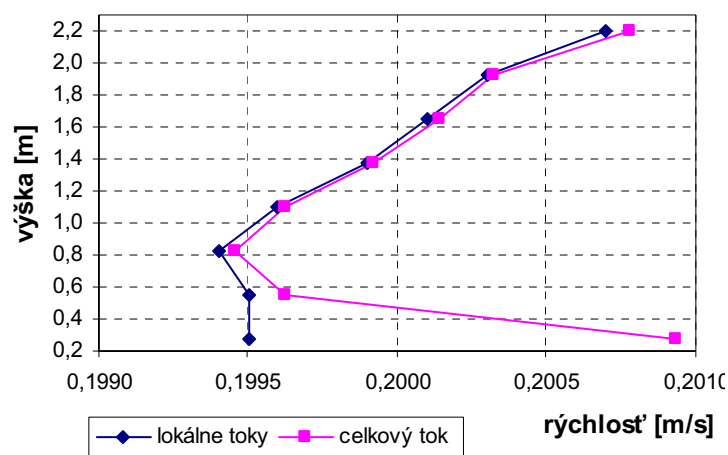
7.2 Vyhodnotenie č.2

Vyhodnotenie číslo 2 spočívalo v analýze rýchlostného profilu, teplotného profilu a teplôt v diskretných bodoch. Vyhodnocovalo sa medzi experimentálnymi hodnotami a vlastným CFD výpočtom, ako aj navzájom medzi CFD výpočtami s odlišnými nastaveniami tepelných tokov na povrchu geometrie tepelného manekýna.

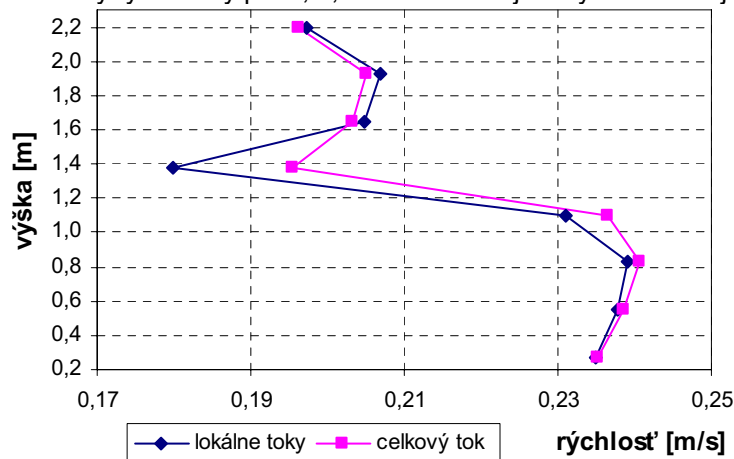
Pri výpočtu CFD modelu tepelného manekýna mal manekýn nastavené lokálne tepelné toky podľa tab.4.7, ako aj konštantný tepelný tok 124 W. Vzájomné porovnávanie vplyvu rôzneho rozloženia tepelného toku u CFD modelov na rýchlostný profil v okolí geometrie modelu sme vykonali v nasledujúcich vertikálnych rovinách:

- $x = 0,19$ m pred čelnou stenou v stredovej osi miestnosti ($z = 0,6$ m)
- $x = 1,69$ m, $z = 0,6$ m
- $x = 2,19$ m (pred zadnou stenou s výustkami).

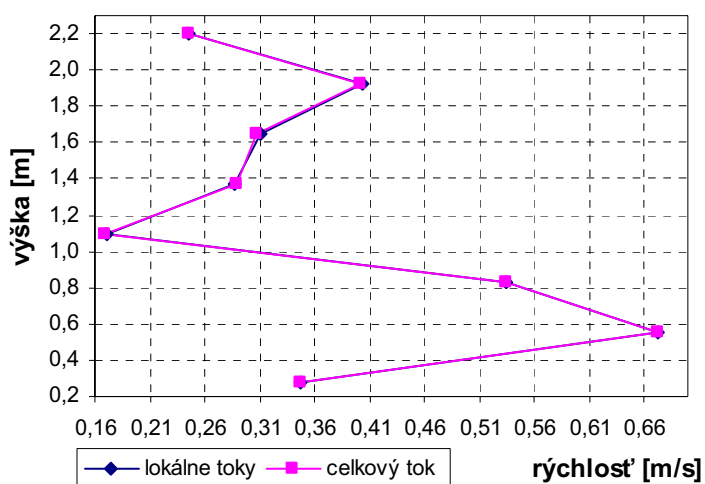
Grafické znázornenie vertikálnych rýchlostných profilov v uvedených rovinách je zobrazené v grafoch 7.4 až 7.6 s vyhodnotením.



Graf 7.4: Vertikálny rýchlostný profil, 0, 19 m od čelnej steny v stredovej rovine.



Graf 7.5: Vertikálny rýchlostný profil, 1,69 m od čelnej steny v stredovej rovine.



Graf 7.6: Vertikálny rýchlostný profil, 2,19 m od čelnej steny v stredovej rovine.

Z grafov 7.4 až 7.6 vyplýva, že priebehy rýchlostí na vstupe, za manekýnom, ako aj pri zadnej stene s výustkami sa pre oba výpočtové modely takmer zhodujú. Hodnoty rýchlostí v diskretných bodoch sa odlišujú maximálne o 1,6 cm/s (cca 10%) vo výške približne 1,4 m (viz graf 7.5), čo je zanedbateľný rozdiel pri daných vstupných podmienkach (vstupná rýchlosť prúdenia 0,2 m/s, pri fyzickej aktivite manekýna 1 met.). Z tohto zistenia jednoznačne vyplýva, že pre analýzu rýchlostných profilov v okolí geometrie tepelného manekýna nie je nutné používať v ďalších skúšobných testoch model tepelného manekýna s možnosťou nastavenia lokálnych tepelných tokov. Táto skutočnosť sa priaznivo odrazí pri ďalších skúšobných testoch napr. v cene a zložitosti použitého tepelného manekýna. Uvedené zistenie platí pri nízkych vstupných rýchlostiach prúdenia, ktoré majú následne malý vplyv na zmeny rýchlosti a charakter prúdenia pri obtekaní geometrie.

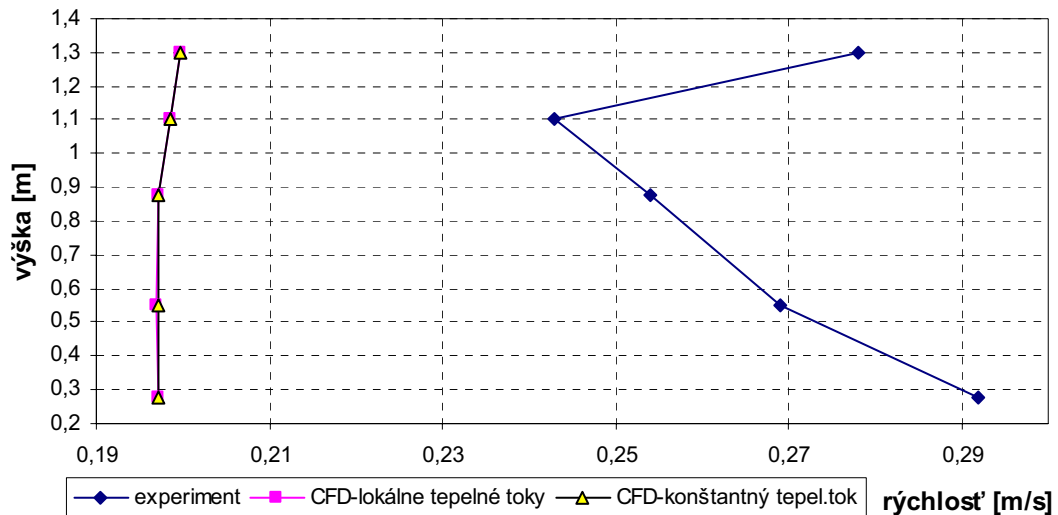
Pri ďalšom vyhodnotení mal v experimentálnej úlohe ženský tepelný manekýn nastavené rôzne veľkosti tepelných tokov (tab.4.7) na jednotlivých častiach tela viz obr.4-11. Vlastný CFD výpočet bol vykonaný pri rovnakých okrajových a počiatočných podmienkach, ktoré odpovedali podmienkam pri experimentálnom meraní viz kapitola 4.

Meranie rýchlostného profilu sa uskutočnilo v dvoch vertikálnych rovinách. Prvá vertikálna rovina pozostávala s piatich meracích bodov, umiestnených v strede miestnosti ($z = 0,6$ m), tesne za čelnou stenou ($x = 0,19$ m). Druhá vertikálna rovina taktiež pozostávala s piatich meracích bodov v strede miestnosti, 0,25 m od zadnej steny s výustkami (obr.4-9). Vyhodnotenie rýchlostných profilov v spomýnaných rovinách sa previedlo pre CFD výpočet s lokálnymi teplotnými tokmi, ako aj s konštantným tepelným tokom. Hodnoty rýchlosti pre jednotlivé situácie (CFD,

experiment) sú uvedené v prílohe č.2 tab.č.1.

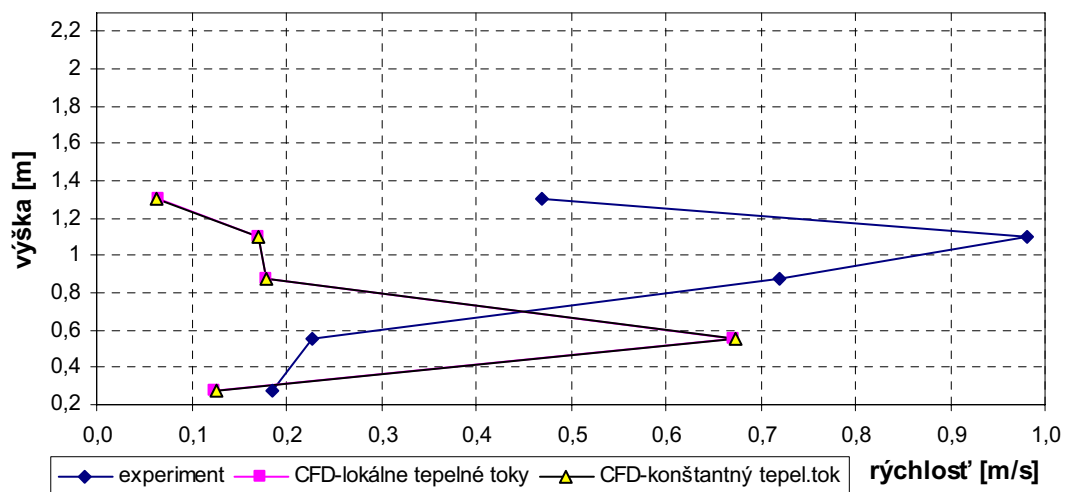
Grafické znázornenie rýchlostných profilov v piatich bodoch pred čelnou stenou a pred výstkami sú zobrazené v nasledujúcich grafoch graf 7.7 až graf 7.8 s vyhodnotením.

Rýchlostný profil v bode $z = 0,6\text{m}$, $x = 0,19\text{m}$



Graf 7.7: Znázornenie rýchlostných profilov pred čelnou stenou.

Rýchlostný profil v bode $z = 0,6\text{m}$, $x = 2,19\text{m}$



Graf 7.8: Znázornenie rýchlostného profilu pred zadnou stenou s výstkami.

V zobrazení experimentálnej krivky v grafe 7.7 je patrné nedodržanie základnej podmienky konštantného rýchlostného profilu na vstupe u nastavenia experimentálnej úlohy. Vstupná rýchlosť čelnou stenou do klimatickej komory taktiež neodpovedá tvrdeniu v nastavení experimentálnej úlohy (viz kapitola 4). Možná príčina uvedených skutočností je bližšie vysvetlená u vyhodnotenia grafu 7.1 v podkapitole „Vyhodnotenie č.1“. Pri ďalšom vyhodnotení sa nebudeme ďalej spomínanou experimentálnou krivkou zaoberať s dôvodu zrejmého nedodržania

počiatočných podmienok, stanovených experimentom.

Charakter aj hodnoty rýchlostného profilu v grafe 7.7 pre obidve CFD modelovej situácie odpovedajú požadovanému laminárnemu rýchlostnému profilu na vstupe do klimatickej komory.

Vyhodnotenie grafu 7.8: Pre obidve CFD modelové situácie vo výškach: 0,27 m, 0,87 m, 1,1 m, 1,3 m a vo vzdialenosti 2,19 m od čelnej steny je pokles rýchlosti zapríčinený zabrzdzením a následným spomalením prúdu vzduchu v medznej vstve pri obtekaní geometrie. Pri obtekaní ideálnej geometrie (válcového tvaru) dôjde na čelnej strane telesa ku zvýšeniu rýchlosti a poklesu tlaku a na odtokovej strane geometrie k opätovnému nárastu tlaku a k zníženiu rýchlosti na hodnoty nerozrušeného prúdu. Vplyvom trenia u reálneho telesa dochádza súčasne ku zníženiu rýchlosti obtekajúceho prúdu v medznej vrstve. Výsledná rýchlosť za telesom je teda vďaka trecím silám nižšia. Vplyv na znižovanie rýchlosti prúdenia v uvedených výškach má aj vzdialenosť spomínaných 2,19 m od čelnej steny.

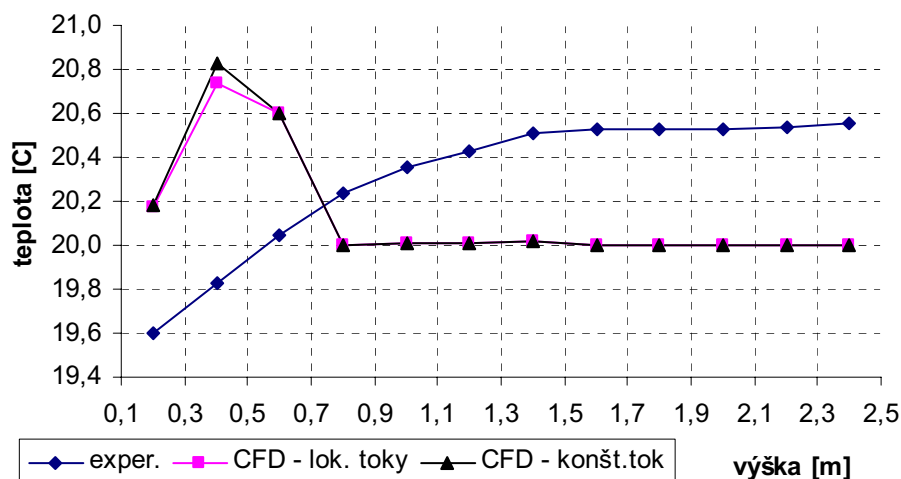
Zvýšenie rýchlosti prúdenia vo výške 0,55 m od podlahy (oblasť medzi dolnými končatinami) na rýchlosť presahujúcu 0,6 m/s, je spôsobené strhávaním a odvádzaním prúdu vzduchu cez spodnú výustku. Os spodnej výustky priemeru 0,25 m je umiestnená 0,6 m nad podlahou, takže uvedená výška spadá do oblasti vplyvu prierezu výustky. Platí, že pri zmenšujúcom sa priereze sa znižuje tlak a zvyšuje sa rýchlosť prúdenia.

Pri porovnaní rýchlostného profilu medzi CFD modelom a rýchlostným profilom zhotoveného na základe experimentálnych hodnôt je patrné výrazné zvýšenie rýchlosti skoro v každom meracom bode. Toto zvýšenie rýchlostí mohlo byť spôsobené opätovným nedodržaním deklarovanej hodnoty vstupnej rýchlosti a profilu prúdiaceho vzduchu cez čelnú stenu. Vo výške 0,55 m od podlahy nedošlo ku zvýšeniu rýchlosti vplyvom výustky ako v prípade rýchlostnej krivky u CFD modelu. Výrazný rozdiel v rýchlostiach medzi modelmi (CFD, experiment), bol zaznamenaný vo výške 1,1 m od podlahy. Toto výrazné zvýšenie rýchlosti v uvedenom bode nemohlo byť spôsobené strhávaním prúdu cez hornú výustku. Pokiaľ boli pri experimentálnom meraní dodržané rozmery umiestnenia výustiek (viz podkapitola 4.2), tak uvedená výška nespadá do oblasti možného vplyvu výustky. Uvedené tvrdenie je doložené skalárnym zobrazením (príloha č.3, obr.č.9) rýchlostných polí a meracieho bodu v inkriminovanej vzdialenosti.

Pri porovnaní charakteru rýchlostného profilu (viz graf 7.7 a graf 7.8) medzi CFD výpočtami s lokálnymi teplotnými tokmi a s konštantným tepelným tokom je zrejmé, že rýchlostné profile v oboch rovinách sú opäť rovnaké.

Vyhodnotenie teplotných polí: Rozloženie termočlánkov na meranie teplôt v diskretných bodoch je znázornené na obr.4-4 až obr.4-7. Namerané hodnoty pre

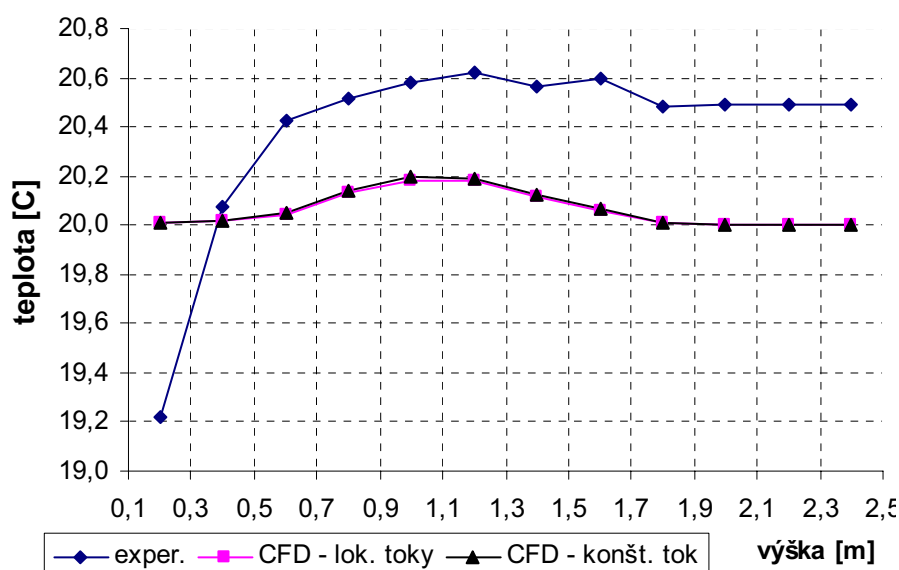
jednotlivé rozloženie termočlánkov, ako aj hodnoty získané CFD výpočtom, sú uvedené v tab.4.1 až tab.4.2. Grafická závislosť teplôt na výške pre jednotlivé meracie body je uvedená v grafe 7.9 až graf 7.11. s vyhodnotením.



Graf 7.9: Horizontálny teplotný profil v meracích výškach 1 až 12.

Pri vyšetrovaní teplotného profilu v grafe 7.9 je patrný strmý nárast teploty nad podlahou pre oba CFD modely. Táto teplotná zmena (nárast) je spôsobená ohrevom prúdu vzduchu pri obtekaní dolných končatín s definovaným tepelným tokom (viz tab.4-7). V ďalších bodoch vo výške nad 0,6 m je teplota nižšia s dôvodu neovplyvnenia prúdu vzduchu vyhrievanou geometriou manekýna. Termočlánky tu boli umiestnené pred telom manekýna (viz obr.4-4), a tým pádom sa teplota nelíšila od definovanej teploty vháňaného vzduchu (20°C) cez čelnú stenu.

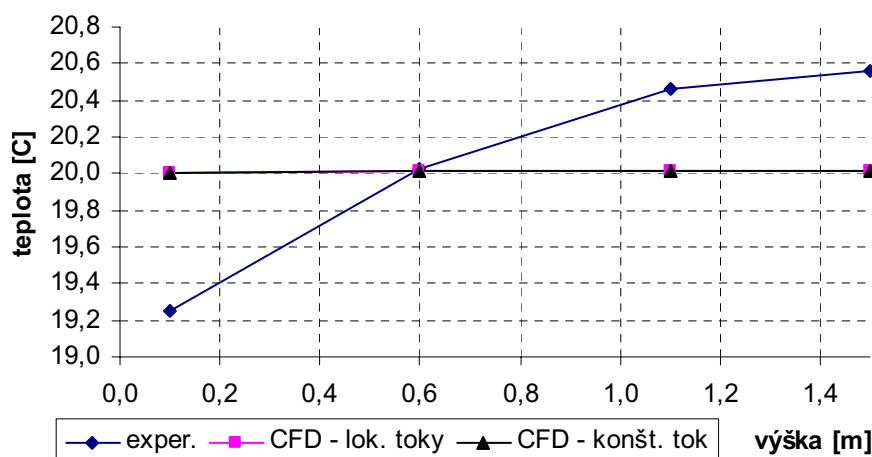
Pri vyhodnotení teplotnej krivky u experimentálneho merania sme zistili, že krivka nevykazuje teplotné ovplyvnenie od figuríny. V dolnej časti do výšky 0,6 m nad podlahou nedochádza k ohrevu vzduchu od dolných končatín figuríny. Teplotný profil odpovedá miestnosti bez vnútorných zdrojov tepla, kde teplota vzduchu je vyššia u stropu ako v spodných častiach. Z grafu je patrné, že nebola dodržaná definovaná vstupná teplota prúdu vzduchu (je tu 19,6°C u podlahy, 20,6°C vo vyšších polohách) a teploty stien. Toto mohlo byť spôsobené nedostatočnou tepelnou izoláciou podlahy a jej následným tepelným ovplyvnením. Vzduch do klimateckej komory bol vháňaný z laboratória, kde mohlo dôjsť k tepelnému ovplyvneniu vzduchu napr. slnečným žiarením (viz obr.4-3).



Graf 7.10: Horizontálny teplotný profil v meracích výškach 13 až 24.

Teplotná krivka v grafe 7.10 pre oba CFD modely nevykazuje teplotné ovplyvnenie vháňaného prúdu vzduchu vyhrievanou figurínou. Teplotné ovplyvnenie v danej meranej oblasti figurínou by ani byť nemalo. Teplota v miestnosti pri danom umiestnení termočlánkov viz obr.5-5 je takmer konštantná.

Pri vyhodnotení teplotnej krivky u experimentálneho merania sme dospeli k rovnakému záveru ako pri vyhodnotení grafu 7.9. Krivka nevykazuje teplotné ovplyvnenie prúdu vzduchu vplyvom vyhrievanej figuríny a vháňaný vzduch pravdepodobne nemal konštantnú teplotu definovanú v experimente, viz kapitola 4. Teplota podlahy rovnako nebola spomýnaných 20°C.



Graf 7.11: Horizontálny teplotný profil pred oknom.

Teplotná krivka pre oba CFD modely graf 7.11 nevykazuje opäť žiadne teplotné ovplyvnenie prúdu vzduchu od figuríny. Teplota pred oknom je rovnaká ako teplota privádzaného vzduchu. Teplotná krivka získaná s experimentálne nameraných hodnôt teploty vzduchu není ovplyvnená vyhrievanou figurínou a jej

priebeh je spôsobený z rovnakých dôvodov ako v predchádzajúcich grafoch viz vyhodnotenie napr. grafu 7.9.

Teploty pre jednotlivé diskkrétne body v miestnosti viz obr.4-7 namerané experimentálne a CFD výpočtom sú uvedené v prílohe č.2 tab.č.3.

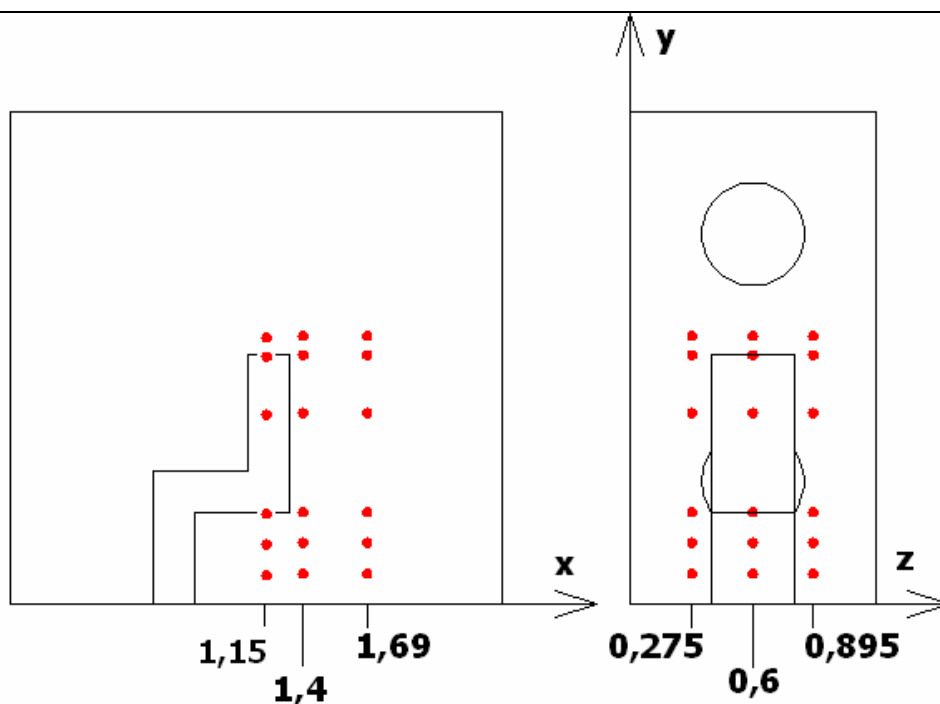
Zhrnutie: Vyhodnocovali sme vplyv lokálnych a konštantných tepelných tokov na teplotný a rýchlostný profil v uvedenom okolí geometrie. Z výsledkov vyplýva, že pre ďalšie skúšobné testy nie je nutné používať tepelného manekýna s možnosťou nastavenia lokálnych tepelných tokov. V ďalšej časti pri vyhodnocovaní teplotného profilu sme prišli k záveru, že v experimentálnej úlohe nebola dodržaná teplota vzduchu na vstupe do miestnosti a ani teplota okolných stien. Pri CFD simulácií sme dodržali definované teplotné podmienky.

7.3 Vyhodnotenie č.3

Vyhodnocovali sme vplyv zjednodušenia geometrie tepelného manekýna na výpočet prúdenia a teplotného profilu v okolí geometrie. CFD model tepelného manekýna, ako aj obe varianty zjednodušenej geometrie, mali nastavený konštantný tepelný tok 124 W.

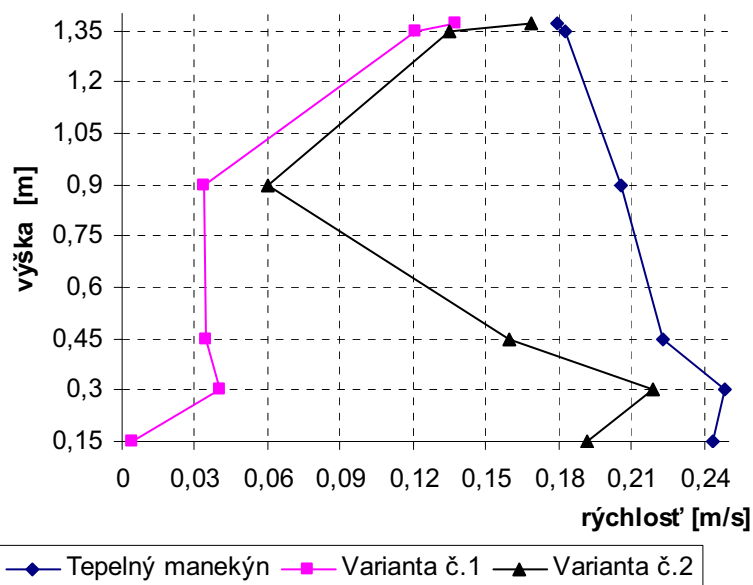
Vlastný CFD výpočet bol vykonaný pri rovnakých okrajových a počiatočných podmienkach, ktoré odpovedali podmienkam pri experimentálnom meraní, viz kapitola 4.

Meranie vertikálneho rýchlostného profilu sa uskutočnilo v troch rovinách v okolí CFD modelu tepelného manekýna, rovnako ako aj v okolí oboch zjednodušených geometrií. Prvá vertikálna rovina bola umiestná po oboch bokoch (vo vzdialenosti 0,05 m od figuríny). Ostatné dve vertikálne roviny boli umiestnené za geometriou. Zobrazenie umiestnenia vertikálnych meracích bodov u CFD modelov je znázornený na obr.7-1.

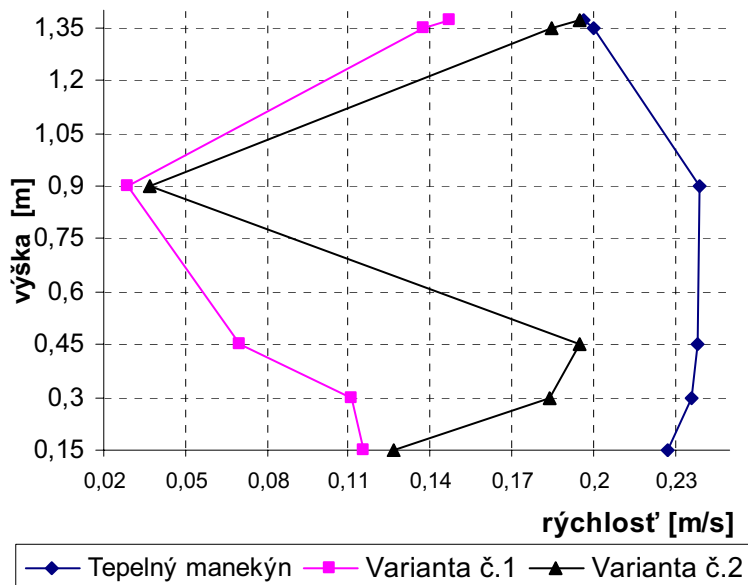


Obr.7-1: Schéma vertikálneho umiestnenia anemometrov.

Vypočítané CFD hodnoty pri hodnotení vertikálneho rýchlostného profilu ako aj výšky umiestnených anemometrov sú uvedené v prílohe č.2, tab.č.2. Grafické znázornenie rýchlostných profilov v stredovej rovine za manekýnom ($z=0,6$ m), sú uvedené v grafoch 7.12 až 7.13 pre vzdialenosť 1,4 m a 1,69 m s vyhodnotením. Rýchlostné profily po bokoch geometrii ($z=0,275$ m, $z=0,895$ m) sú uvedené v prílohe č.1, graf č.7 a graf č.8.



Graf 7.12: Vertikálny rýchlostný profil vzdialený 1,4 m od čelnej steny v stredovej osi manekýna.



Graf 7.13: Vertikálny rýchlostný profil vzdialený 1,69 m od čelnej steny v stredovej osi manekýna.

Varianta č.1 a varianta č.2 predstavuje zjednodušený model tepelného manekýna, viz obr.6-2 a obr.6-3. Pri hodnotení rýchlostnej krivky v grafe č.7.12 a v grafe 7.13 u varianty č.1 je vidieť výrazný vplyv geometrie na veľkosť rýchlosti prúdenia v oblasti dolných končatín.

Do výšky 0,6 m nad podlahou je rýchlosť prúdenia vzduchu u varianty č.1 podstatne nižšia v porovnaní s variantou č.2 a s CFD tepelným manekýnom v grafe 8.12 a 8.13. Pokles rýchlosti v uvedenej výške (oblasť dolných končatín) za manekýnom, je spôsobený narazením a zabrzdením prúdu vzduchu o čelnú plochu (premena kinetickej energie prúdu na potenciálnu) a následným pomalším prúdením vzduchu v medznej vrstve pozdĺž povrchu, viz skalárne zobrazenie v prílohe č.3, obr.č.1.

Veľkosť rýchlosti v uvedenej výške pre variantu č.2 (v oboch grafoch) odpovedá voľnému neodtrženému prúdeniu vzduchu medzi dolnými končatinami geometrie, viz skalárne zobrazenie rýchlostí v prílohe č.3, obr.č.2.

Pre oblasť nad dolnými končatinami (vo výške nad 0,6 m) je charakter rýchlostného profilu pre varianty č.1 a č.2 u oboch grafov podobný. Z oboch grafov sa dá vyčítať, že za trupom je väčšia rýchlosť prúdenia u oboch variantách zjednodušenej geometrie (v porovnaní s rýchlosťou v oblasti dolných končatín). Je dôležité pripomenúť, že meracie body sa síce nachádzajú v rovnakej vzdialenosti od čelnej steny (1,4 m a 1,69 m), ale nie v rovnakej vzdialenosti od geometrie. Napríklad vzdialenosť geometrie dolných končatín (počítané od lýtky) od meracích bodov je 0,55 m (pre meracie body umiestnené 1,4 m od čelnej steny), kdežto vzdialenosť trupu (počítané od chrbta) je len 0,1 m od meracích bodov rovnako vzdialených 1,4 m od čelnej steny. Meracie body za trupom sa teda nachádzajú v oblasti, kde prúdenie pre obtekanie telesa ešte není ustálené a následne dochádza

ku zníženiu rýchlostí na pôvodnú hodnotu nerozrušeného prúdu pred telesom.

V grafoch 7.12 a 7.13, pre situáciu s CFD tepelným manekýnom, boli v oblasti dolných končatín namerané vyššie hodnoty rýchlosti (s maximom vo výške 0,65 m) v diskretných bodoch v porovnaní s variantou zjednodušenej geometrie č.2. Tieto vyššie hodnoty rýchlosti sú spôsobené menším tvarovým odporom geometrie (aerodynamickejšim tvarom tepelného manekýna) pri obtekaní telesa, v porovnaní s variantami zjednodušenej geometrie. Tvarový odpor vzniká vytvorením miestneho nízkeho tlaku na zadnej strane geometrie vplyvom možného odtrženia medznej vrstvy. Tento tvarový odpor spolu so šmykovým napätím (trenie v medznej vrstve) tvorí celkový odpor geometrie.

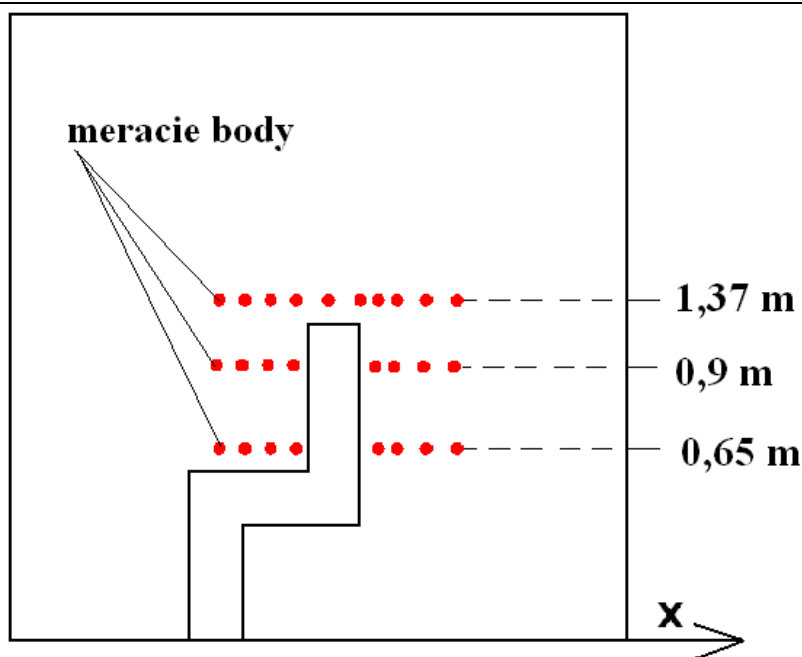
V oblasti nad dolnými končatinami (meranej za manekýnom) v grafe 7.12 je vidieť pokles rýchlosti spôsobený zabrzdzením a následným spomalením prúdu vzduchu v medznej vrstve pri obtekaní pozdĺž trupu figuríny. Ďalej platí, že pri nútenom obtekaní telesa existuje nenulový tlakový gradient. Prúd vzduchu prúdiaci pozdĺž prednej nábežnej plochy geometrie (kolmej k smeru prúdenia), je vplyvom poklesu tlaku urýchľovaný a naopak v zadnej časti geometrie dôjde k opätovnému nárastu tlaku a k spomaleniu rýchlosti prúdenia. Tento nenulový tlakový gradient má výrazný vplyv na vývoj medznej vrstvy (odtrženie).

Vo výške nad hlavou (1,37 m) je rýchlosť pre všetky tri geometrie takmer rovnaká, viz rozdiel rýchlostí v prílohe č.2, tab.č.4. Prúdenie vzduchu má v danej oblasti charakter neviskózneho potencionálneho prúdenia.

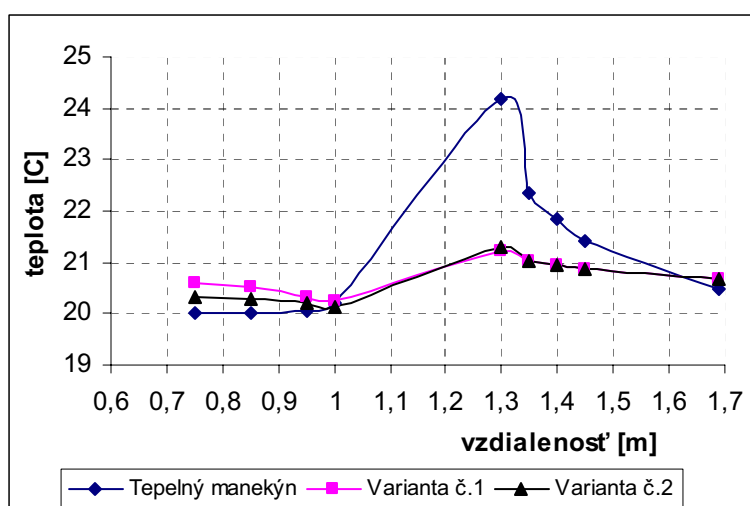
V grafe 7.13 je charakter rýchlostného profilu obdobný ako v predchádzajúcom grafe s tým rozdielom, že vo vzdialenosti 1,69 m od čelnej steny sa prúd vzduchu javí ustálenejší s väčším vplyvom zadnej steny s výstškami na rýchlosť prúdenia.

Hodnoty rýchlostí v diskretných bodoch sa pre vzdialenosť 1,4 m a 1,69 m od čelnej steny pre jednotlivé výšky a situácie (tepelný manekýn a zjednodušené geometrie) líšia, viz príloha č.2, tab.č.4.

Vo vyhodnotení č.3 bol vyšetrovaný aj horizontálny teplotný profil v okolí geometrie manekýna v troch rovinách vo výškach 0,65 m, 0,9 m a 1,37 m od podlahy, viz obr.7-2. Meracie body pre všetky meracie výšky boli umiestnené v stredovej rovine miestnosti ($z = 0,6$ m). Tepelný manekýn, ako aj obe varianty zjednodušenej geometrie, mali nastavenú hodnotu tepelného toku 124 W. Teplota vzduchu v miestnosti bola nastavená na 20°C. Vypočítané CFD hodnoty teplôt pre horizontálne profily v daných výškach sú uvedené v prílohe č.2, tab.č.5 až tab.č.7.



Obr.7-2: Schématické znázornenie meracích bodov v horizontálnych rovinách.



Graf 7.14: Horizontálny teplotný profil vo výške 0,65 m od podlahy.

Priebeh teplotného profilu v grafe 7.14 je pre obe varianty zjednodušenej geometrie takmer rovnaký. Vo vzdialenosti 0,75 m až do vzdialenosti 1 m od čelnej steny (vo výške 0,05 m nad dolnými končatinami) sa teplota udržiava v rozsahu $20,3 \pm 0,2^\circ\text{C}$. V prípade tepelného manekýna sa v daných vzdialenostiach teplota udržiava v rozsahu $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$ viz prílohy č.2 tab.č.5. Teplota sa v danej oblasti príliš nezvyšuje s dôvodu dostatočného odvodu vyprodukovaného tepla prostredníctvom vŕhnaného vzduchu cez čelnú stenu. Tento odvádzaný tepelný tok s dolných končatín ovplyvňuje ale teplotu vzduchu za manekýnom.

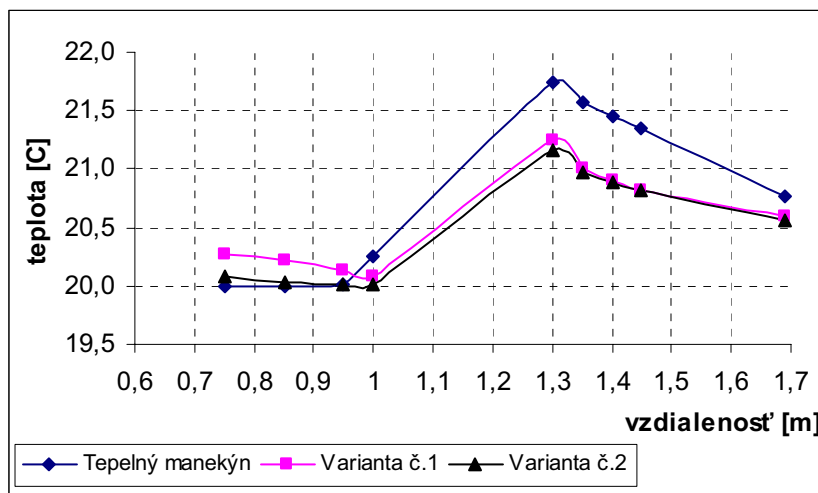
Vo vzdialenosti 1,3 m od čelnej steny (merací bod sa nachádza v oblasti tesne za chrbtom) sme zaznamenali mierny nárast teploty na hodnotu $21,2^\circ\text{C}$ pre obe

varianty zjednodušenej geometrie. Tento nárast teploty o $1,2^{\circ}\text{C}$ (referenčná teplota je nastavená teplota v miestnosti na 20°C) je spôsobený konvektívnym prenosom tepla (tepelného toku) s geometrie do blízkeho okolného vzduchu. V prípade tepelného manekýna sme v danom bode zaznamenali teplotu až nad 24°C . Tento nárast teploty je spôsobený bližším umiestnením meracieho bodu ku vyhrievanej figuríne, v porovnaní so zjednodušenou geometriou. Toto bližšie umiestnenie meracieho bodu je dané geometrickým tvarom tepelného manekýna, viz obr.č.3 v prílohe č.3.

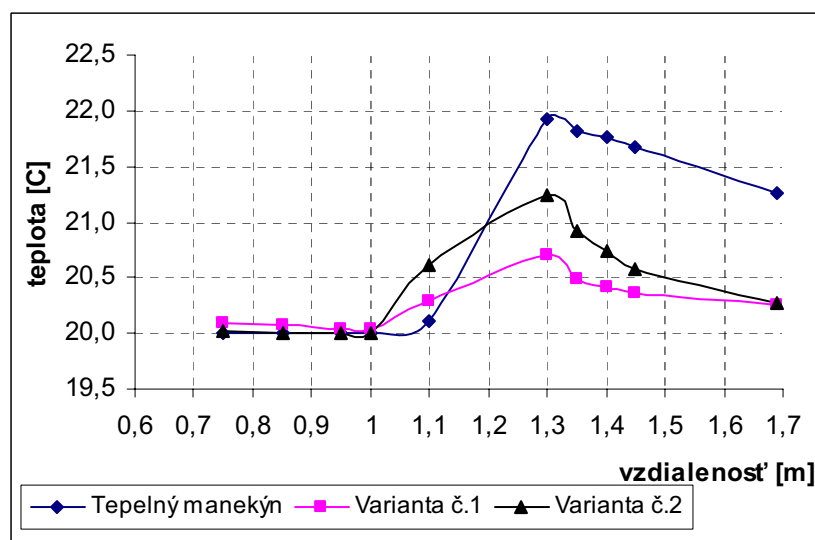
Zvyšovanie alebo znižovanie teploty vzduchu závisí na vzdialenosti meracích bodov od zdroja žiarenia (vyhrievaná geometria), ako aj na teplote okolitého vzduchu a na rýchlosti prúdenia. Zo vzrastajúcou vzdialenosťou meracích bodov od zdroja žiarenia dochádza vplyvom premiešavania prúdov vzduchu (s rozdielnou teplotou) k poklesu teploty, viz obr.č.4 v prílohe č.3. V uvedenej prílohe je znázornené aj odvádzanie ohriateho vzduchu od figuríny hornou výustkou. Zo vzrastajúcou teplotou vzduchu sa znižuje jeho hustota. S rozdielných hustot vzduchu vzniká vztlačová síla a tým pádom teplejší vzduch prúdi ku stropu miestnosti, kde je strhávaný hornou výustkou.

Priebeh ako aj teploty v grafe 7.15 vo výške 0,9 m od podlahy (oblasť trupu), je do vzdialenosti 1 m od čelnej steny takmer zhodný s grafom 7.14. Príčina tejto skutočnosti je taktiež uvedená vo vyhodnotení grafu č. 7.15.

V meracích bodoch za chrbtom vo vzdialenosti 1,3 m až 1,7 m od čelnej steny je vidieť mierny nárast teploty maximálne o $1,5^{\circ}\text{C}$ (teplotná krivka v situácii s tepelným manekýnom). Toto zvýšenie teploty, je u teplotnej krivky tepelného manekýna (v porovnaní s teplotnými krivkami zjednodušených geometrií), prevažne zapríčinené blízkosťou meracieho bodu a zdroja tepla (merací bod 1,3 m) ako aj tepelným tokom odvádzaného z dolných končatín (ostatné meracie body). Ohriaty teplejší vzduch s menšou hustotou prúdi navrch. Skalárne zobrazenie teplotného poľa v danom reze je uvedené na obr.č.5 v prílohe č.3. Hodnoty teplôt pre horizontálnu rovinu 0,9 m nad podlahou sú uvedené v prílohe č.2, tab.č.6.



Graf 7.15: Horizontálny teplotný profil vo výške 0,9 m od podlahy.



Graf 7.16: Horizontálny teplotný profil vo výške 1,37 m od podlahy.

Horizontálny teplotný profil vo výške 1,37 m (nad hlavou manekýna) zobrazuje graf 7.16. Na uvedenom grafe sa teplota nad dolnými končatinami v danej výške udržiava takmer na konštantnej hodnote 20°C, viz príloha č.2, tab.č.6. Vplyv tepelného toku z figuríny je v danej oblasti veľmi malý. Ovplyvnenie teplot vzduchu tepelným tokom z geometrií je patrné vo vzdialenosti 1,1 m (meriaci bod leží priamo nad hlavou) od čelnej steny. Teplota vzduchu v danom bode stúpila maximálne o 0,5°C, čo je nepatrné.

V meracom bode vo vzdialenosti 1,3 m od čelnej steny je vidieť vyšší rozptyl teplôt medzi jednotlivými variantami ako v predchádzajúcom prípade graf 7.15. Teplota sa líšila maximálne o 1,2°C. Priebeh teplôt v ostatných meracích bodoch a vzdialenostiach je ako v predchádzajúcich prípadoch ovplyvnený odvádzaním tepelného toku s povrchu geometrie.

Zhrnutie: V tejto časti práce sme zisťovali vplyv zjednodušenia geometrie tepelného manekýna na teplotný a rýchlostný profil. Zistili sme, že neprítomnosť medzeri medzi nohami vo variante zjednodušenej geometrie č.1 výrazne ovplyvňuje prúdenie vzduchu za dolnými končatinami. Hranatý tvar zjednodušených geometrií má tiež výraznejší vplyv na hodnoty rýchlosti v meraných oblastiach.

7.4 Vyhodnotenie č.4

Táto kapitola sa zaoberá vyhodnotením vplyvu zjednodušenia geometrie tepelného manekýna na výpočet tepelných strát. Vyhodnotenie sa realizovalo pomocou CFD tepelného manekýna ako aj oboch variant zjednodušenej geometrie.

Všetky tri geometrie mali nastavený tepelný tok na 124 W a teplota vzduchu v miestnosti a stien bola nastavená na 20°C. Vzduch sa vhaňal celým prierezom čelnej steny o definovanej konštantnej rýchlosti 0,2 m·s⁻¹. Výstup vzduchu sa realizoval cez zadnú stenu s výstkami. Analýzu tepelných strát z jednotlivých geometrií sme previedli na základe vyhodnotenia prenosu tepla a tepelného prírastku cez obe výstky.

Tab.7.1: Prenos tepla cez jednotlivé výstky a tepelný prírastok zjednodušených geometrií.

	D. výstka	H. výstka	Celkom	Δ	
	°C	°C	°C	°C	%
Tepelný manekýn	20,1774	20,1024	20,1399	0,1399	
CFD varianta č.1	20,605	20,17	20,388	0,388	177
CFD varianta č.2	20,4858	20,0848	20,2853	0,2853	103

V tab.7.1 sú uvedené stredné hodnoty teplôt odvádzaného vzduchu cez dolnú a hornú výstku, ako aj tepelný prírastok, kde je tepelný manekýn braný ako 100% vzťažná hodnota. Delta je rozdiel medzi teplotou vstupujúceho vzduchu do miestnosti (20°C) a strednej teploty vzduchu odvádzaného cez jednotlivé výstky. S uvedenej tabuľky je zrejmé, že najväčší tepelný prírastok bol zaznamenaný u varianty č.1. Plocha zjednodušenej geometrie varianty č.1 je v porovnaní s variantou zjednodušenej geometrie č.2 väčšia o 0,29 m². Táto nekonštantná veľkosť plôch spôsobila uvedený zvýšený tepelný prírastok o 0,1 °C, čo sa dá považovať za zanedbateľné. Percentuálny tepelný prírastok počítaný s rozdielom teplôt (delta), medzi CFD tepelným manekýnom a oboma variantami zjednodušenej geometrie, bol v prípade varianty č.1 o 177% a v prípade varianty č.2 o 103% vyšší než percentuálny prírastok od tepelného manekýna viz tab.7.1. V konečnom dôsledku to ale znamená, že tepelný prírastok v miestnosti sa vplyvom prenosu tepla zo zjednodušených geometrií zvýšil v podstate maximálne len o 0,38°C. Uvedené zvýšenie teploty o 0,38°C je zanedbateľné.

V ďalšej časti vyhodnotenie spočívalo v CFD analýze radiačného a konvektívneho tepelného toku z povrchu nahého tepelného manekýna. Tepelný

manekýn mal na celom svojom povrchu nastavenú okrajovú podmienku tepelný tok o konštantnej hodnote 124 W. Sledovali sme vplyv prúdiaceho vzduchu o definovanej vstupnej rýchlosti $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a teplote 20°C na veľkosť tepelnej straty manekýna. Teplota vzduchu v klimatickej komore, ako aj teplota okolitých stien, bola nastavená na 20°C , viz kapitola č.4. Umiestnenie tepelného manekýna v klimatickej komore bolo rovnaké ako v kapitole č.4.

Teplota na povrchu tepelného manekýna bola rôzna v závislosti na orientácii časti tela ku smeru prúdenia vzduchu cez čelnú stenu, viz príloha č.3, obr.č.6. Lokálny prestup tepla sa mení po obvode povrchu manekýna a je značne ovplyvnený rýchlosťou prúdenia. Zo zvyšujúcou sa rýchlosťou prúdenia vzduchu vzrastá odvod tepla konvekciou z povrchu manekýna. Na uvedenom obrázku je vidieť pokles povrchovej teploty prednej časti tela manekýna. Toto zníženie povrchovej teploty (v porovnaní so zadnou časťou tela) je spôsobené intenzívnejším odvádzaním tepla konvekciou prúdom vzduchu. Priemerné hodnoty teplôt jednotlivých častí tela sú uvedené v prílohe č.2, tab.č.8. Minimálna priemerná povrchová teplota jednotlivých častí tela bola 29°C a maximálna povrchová teplota 33°C . Na obr.č.6 v prílohe č.3 je možné vidieť lokálne zvýšenie teploty nad fyziologickú hranicu (označené šípkami). Toto lokálne zvýšenie teploty môže byť spôsobené nasledujúcim:

- možným odtržením medznej vrstvy v danej oblasti, tým výrazne klesá prestup tepla a môže dôjsť k lokálnemu zvýšeniu teploty,
- nedostatočným odvádzaním tepla prúdom vzduchu,
- vplyvom radiačného tepelného toku v blízkosti na seba kolmých plôch
- použitý tepelný manekýn nemá schopnosť žiadnej vlastnej termoregulácie

Hodnoty veľkostí radiačného (vyžiareného) a konvektívneho (odvedeného) tepelného toku sú uvedené v prílohe č.2, tab.č.9. Skalárne zobrazenia radiačného a konvektívneho toku sú uvedené v prílohe č.3, obr.č. 7 a obr.č.8. Vzájomný pomer konvektívneho a radiačného tepelného toku je uvedený v prílohe č.2, tab.č.9. Z pomeru tepelných tokov je zrejmé, že konvektívny (odvedený) tepelný tok je niekoľkonásobne vyšší ako radiačný (vyžiarený) tepelný tok.

Zhrnutie: Vo vyššie uvedenom vyhodnotení sme zistili, že použitý tepelný manekýn sa pri prúdení vzduchu cez čelnú stenu ochladzuje nerovnomerne. Na určitých častiach tela tepelného manekýna sme zistili nefyzilogické hodnoty povrchových teplôt. Tepelný tok s varianty č.1 bol v porovnaní s variantou č.2 vyšší v dôsledku väčšej plochy. Odvedený tepelný tok s povrchu manekýna je niekoľkonásobne vyšší ako radiačný tepelný tok.

ZÁVER

Táto práca sa zaoberá vyhodnotením a porovnávaním experimentálnej úlohy s použitím zaplavovacieho vetrania, pri ktorej bol použitý model tepelného manekýna Comfortina s definovaným tepelným tokom. Porovnávali sme navzájom teplotné a rýchlostné profily z experimentálne nameraných hodnôt s hodnotami získaných vlastným CFD výpočtom modelu tepelného manekýna. V prvej časti sa zaoberáme vplyvom lokálneho a konštantného tepelného toku CFD manekýna na rýchlostný a teplotný profil a následne sme v ďalšej časti skúmali vplyv zjednodušenej geometrie tepelného manekýna s definovaným tepelným tokom na teplotné a rýchlostné pole v blízkosti modelu. Na záver sme sa zaoberali výskumom tepelných strát s povrchu CFD modelu tepelného manekýna ako aj z povrchu zjednodušených geometrií.

Pri vyhodnotení vertikálneho rýchlostného profilu a profilu teplôt zhotovených z experimentálne nameraných hodnôt sme zistili, že pri realizácii experimentu neboli dodržané deklarované vstupné podmienky, ako je konštantný rýchlostný profil prúdenia na vstupe, ako aj rýchlosť a teplota prúdenia vzduchu do miestnosti. Použitím CFD modelu sme zachovali definované počiatočné podmienky, stanovené pre experiment.

Z výsledkov pri použití lokálnych a konštantných tepelných profilov na povrchu manekýna je zrejmé, že pre ďalšie skúšobné testy nie je nutné používať tepelného manekýna s možnosťou nastavenia lokálnych tepelných tokov, čo sa priaznivo odrazí na cene celého experimentu.

Pre lepšie využitie zjednodušených geometrií v skúšobných testoch zaoberajúcich sa prúdením a obtekaním vzduchu okolo geometrie doporučujeme používať model bez hranatých tvarov zo zachovaním jednotlivých proporcií tela.

Pri čelnom prúdení vzduchu sa manekýn ochladzoval nerovnomerne v dôsledku chýbajúcej telesnej regulácie teploty. Z výpočtu sme zistili, že odvedený tepelný tok konvekciou s povrchu manekýna je viacnásobne vyšší, ako vyžiarený radiačný tepelný tok.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Trojan, S.: *Lékařská fyziologie*, nakladatel'stvo Garda Publishing, a.s. 2008. 772s. ISBN 80-247-0512-5.
- [2] Chyský, J., Hemzal, K.: *Větrání a klimatizace*, nakladatelství a vydavatelství BOLIT – B press Brno, 1993. 560s. ISBN 80-901574-0-8.
- [3] Fanger, P.O.: *Thermal comfort*. Danish Technical Press. Copenhagen 1970.
- [4] Staněk, J., Kubíčková M.: *Oděvní materially*, skriptum VŠST Liberec, 1986.
- [5] Axamit, P.: *Transportní jevy v systému člověk – oděv- prostředí*, (FYZ 9/82) SVÚT Liberec, 1982.
- [6] *Heat transfer*, [online]. [cit.2010-04-05]. Dostupné z http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer
- [7] Pavelek, M. a kol.: *Termomechanika*, akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2003, 280s. ISBN 80-214-2409-5.
- [8] Jícha, M.: *Prenos tepla a látky*, akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2001, 150s. ISBN 80-214-2029-4.
- [9] Oppl, L.: *Optimální a přípustné mikroklima v místnostech*. Klimatizace, Janka 1989.
- [10] Nillsson O.H.: *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models*. Doctoral thesis. University of Gavle, 2004.
- [11] Holmer, I. *Thermal manikin history and applications*. Evropské Journal of Applied Physiology 92 (6) 2004.
- [12] ČSN EN ISO 14505, *Ergonomie tepelného prostředí – hodnocení tepelného komfortu ve vozidlech*. Český normalizační institut, 2007.
- [13] Pokorný, J. – Fišer, J.: Používané modely lidského tepelného komfortu. Strojárstvo/ Strojírenství, 2009, roč. 2009, č. mimořádné, pp. 209–210. ISSN: 1335– 2938.
- [14] Fiala D., Lomas K.J., Stohrer M.: *A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system*. J. Appl Physiol 87:1957–1972, 1999.
- [15] Fiala D., Lomas K.J., Stohrer M.: *Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions*. Int.J.Biometeorol, 2001.
- [16] *THESEUS-FE®*, Theory Manual Version 2.1, P+Z Engineering GmbH, Munich, 2007. [online]. [cit.2010-04-05]. Dostupné z www.theseus-fe.com
- [17] Huizenga C.H., Zhang H., Arens E.: *A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments*. Build Environ 36:691– 699, 2001.

- [18] Zhang H.: *Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments*. PhD thesis, University of California, Berkley, 2003.
- [19] Norma ČSN EN ISO 7730: *Mírné tepelné prostředí - stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody*. Český normalizační institut, 1997.
- [20] Vládní nařízení č. 178/2001 Sb. ze dne 18. 4. 2001, *Podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci*, Sbírka zákonů ČR, 2001.
- [21] Kabele, K., Kadlecová, M., Krtková, Z.: *Application of the computer simulation in warm-air heating system design in low-energy buildings*. Proceedings of the 4th international conference Energy for Buildings, pp 271-287, Vilnius, 2000.
- [22] Fanger, P.O.: *Thermal comfort*. McGraw-Hill, New York. 1972.
- [23] *Wind Chill Science and Equations*, [online]. [cit.2010-04-05]. Dostupné z http://www.msc.ec.gc.ca/education/windchill/Science_equations_e.cfm
- [24] *Thermal Manikins – control*, [online]. [cit.2010-04-05]. Dostupné z <http://pt-teknik.dk/p10.php>
- [25] Zukowska, D., Melikov, A., Popiolek, Z.: *Thermal plume above a simulated sitting person with different complexity of body geometry*, Department of Heating, Faculty of Environmental Engineering and Energy, Silesian University of Technology, PL-44-101 Gliwice, Poland and International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark, DK-2800
- [26] Forman, M.: *Počítačové modelovanie procesov spalovania v spalovačom komore leteckého motoru M 701*, diplomová práca. 1998.
- [28] *Diskretizace východních rovnic – numerické modelování*, [online]. [cit.2010-04-05]. Dostupné: http://209.85.135.132/search?q=cache:oS23_mQQAokJ:knc.czu.cz/~vachm/fluid/NS_diskr.doc+Diskretizace+východních+rovníc&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz
- [29] Molnár, V.: *Počítačová dynamika tekutín*, 2009, [online]. [cit.2010-04-05]. Dostupné z <http://www.cfd.sk/cfd-book/masterhtml.html>
- [30] Jokl, M.: *Teorie vnitřního prostředí budov*, Skripta ČVUT Praha, 1993
- [31] Pavelek, M.: *Senzory pro hodnocení tepelného stavu a pohody prostředí – prezentace*, Odbor termomechaniky a techniky prostředí EÚ FSI VUT v Brně.
- [32] Forman, M.: *Fyzikálne modely - turbulenc*, prednáška, odbor Termomechaniky a Techniky prostredí, Brno 2009.
- [33] Deardorff, J.W.: *A three-dimensional numerical study of turbulent channel flow at large Reynolds numbers*, J. Fluid Mech. 41, 453s, 1970.
- [34] Pelant, J., Kyncl, M.: *Applications of the Navier-Stokes Equations for 2D and 3D Viscous Turbulent Flow on Steady or Moving Grids with the (k, ϵ) Turbulent Model*; ARTI Reports VZLÚ R-4153, Praha, 2007.

- [35] František K.: *Základy biologie člověka* Klatovy, 1994, [online]. [cit.2010-04-05]. Dostupné:http://ms.gymspgs.cz:5050/bio/Sources/Photogallery_Detail.php?intSource=1&intlmageld=364
- [36] Nilsson, H.O., Brohus, H.,Nielsen V.P.: *Benchmark test for a computer simulated Person,version of february 2007* [online]. [cit.2010-04-05]. Dostupné http://people.civil.aau.dk/~i6pvn/cfd-benchmarks/cps_benchmark_comfort/070215%20manikin_heat_loss_benchmark_200702.pdf
- [37] Dantec Dynamics [online]. [cit.2010-04-05]. Dostupné: <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=437>
- [38] Hájek, J.: *Modelování s využitím CFD*, Brno 2008.
- [39] Centnerová, L.: *Tradiční a adaptivní model tepelné pohody*. Disertační práce, ČVUT v Praze 2001.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratka	Jednotka	Názov
A	$[m^2]$	Povrch odevu
A_D	$[m^2]$	Povrch nahého ľudského tela
c	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$	Súčiniteľ vzájomného osálenia
dT	$[^{\circ}C]$	Elementárna zmena teploty
dx	$[m]$	Element dráhy
f_c	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$	Súčiniteľ zväčšenia povrchu
f_w	$[-]$	Stupeň zvlhčenia kože
\dot{q}	$[W \cdot m^{-2}]$	Merný tepelný tok
\dot{q}_r	$[W \cdot m^{-2}]$	Merný tepelný tok zdieľaný radiáciou
\dot{q}_m	$[W \cdot m^{-2}]$	Metabolické teplo
\dot{Q}	$[W]$	Tepelný tok
\dot{Q}_K	$[W]$	Tepelný tok konvekciou
\dot{Q}_R	$[W]$	Tepelný tok radiáciou
\dot{Q}_{d1}	$[W]$	Citeľné teplo
\dot{Q}_{d2}	$[W]$	Latentné teplo
\dot{Q}_{w1}	$[W]$	Teplo odvedené vyparovaním vodnej páry
\dot{Q}_{w2}	$[W]$	Teplo odvedené vyparovaním vylučovaného potu
h	$[m]$	Výška
m	$[kg]$	Hmotnosť
p	$[Pa]$	Tlak
p_d	$[Pa]$	Tlak vodnej páry vo vdychovanom vzduchu
P	$[W]$	Mechanický výkon
PPD	$[\%]$	Percentuálny podiel nespokojných
PMV	$[-]$	Predicted Mean Vote
R	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$	Tepelný odpor odevu
S	$[m^2]$	Plocha
S_w	$[m^2]$	Časť povrchu zmáčaná potom
t_s	$[^{\circ}C]$	Stredná teplota pokožky
t_p	$[^{\circ}C]$	Teplota pokožky
t_a	$[^{\circ}C]$	Teplota okolia

t_u	[°C]	Teplota okolitých plôch
t_o	[°C]	Operatívna teplota
t_g	[°C]	Teplota guľového teplomeru
t_r	[°C]	Stredná radiačná teplota
t_{eq}	[°C]	Ekvivalentná teplota
T_w	[°C]	Teplota povrchu obtekaného telesa
T_∞	[°C]	Teplota tekutiny
v_{ar}	[m · s ⁻¹]	Relatívna rýchlosť prúdenia vzduchu
α	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	Súčiniteľ prestupu tepla
α_K	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou
α_R	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	Súčiniteľ prestupu tepla radiáciou
λ	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	Tepelná vodivosť
η	[%]	Účinnosť
3D		Troj rozmerný (dimenzionálny)
CAD		Computer Aided Desing, Drafting
CSP		Computer Simulation Person
ČSN		Československá štátna norma
EN		Európska norma
CFD		Computational Fluid Dynamics
FEA		Finite Element Analysis
FVM		Finite Volume Metod
ISO		International Organization for Standardization
IGES		International Graphic Exchange Specification
RANS		Reynolds Avaraged Navier-Stokes
STL		Standard Template Library

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr.1-1: Kolísanie teploty tela počas dňa [1]	9
Obr.1-2: Prenos tepla medzi ľudským telom a okolím [35].....	12
Obr.1-3: Schéma transportu tepla odevným systémom [4].	16
Obr.2-1: Funkčná závislosť predpovede percentuálneho podielu nespokojných ľudí (PPD) na predpovedi stredného tepelného pocitu (PMV) [3].....	23
Obr.3-3: Znázornenie snímača typu umelá koža [31].	27
Obr.3-1: Zobrazenie 32 segmentov figuríny [31].....	28
Obr.3-2: Zobrazenie 16 segmentov figuríny [31].....	28
Obr.4-1: Model tepelného ženského manekýna Comfortina [25].	30
Obr.4-2: Schematické znázornenie klimatickej komory a) bočný pohľad, b) pohľad na zadnú stenu s umiestnenými kruhovými výstkami.....	31
Obr.4-3: Odvádzanie vzduchu cez kruhové výstky [36].	32
Obr.4-4: Zobrazenie umiestnenia 12 termočlánkov pred tepelným manekýnom.	33
Obr.4-5: Zobrazenie umiestnenia 13 až 24 meracích bodov pred zadnou stenou.	34
Obr.4 -6:Znázornenie umiestnenia 4 termočlánkov pri ľavej stene a u oboch výustiek.	35
Obr.4-7: Grafické znázornenie umiestnenia termočlánkov na podlahe, okne a stropu.	36
Obr.4-8: Rozmiestnenie anemometrov v klimatickej komore, a) bočný pohľad, b) pohľad spredu.	38
Obr.4-9: Rozdelenie anemometrov za vstupom a pred výstkami.....	40
Obr.4-10: Úseky horizontálnych rýchlostných profilov.	41
Obr.4-11: Rozdelenie jednotlivých častí tela.	42
Obr.5-1: Schéma lokálnej diskretizácie siete [28].	43
Obr.6-1: Geometrický model tepelného manekýna Comfortina.	46
Obr.6-3: Znázornenie zjednodušenej geometrie manekýna, varianta č.2.	47
Obr.6-2: Zjednodušená geometria manekýna, varianta č.1.	47
Obr.6-4: Miera zjednodušenia, zjednodušenej geometrie tepelného manekýna.	48
Obr.6-5: Znázornenie súradného systému, vstupnej (modrej) a výstupnej (žltej) plochy.....	49
Obr.6-6: Ukážka povrchovej polyhedrálnej siete.....	51
Obr.6-7: Znázornenie medznej vrstvy v reze klimatickej komory.	52
Obr.6-8: Zobrazenie objemových zhustení v situácií s tepelným manekýnom....	53
Obr.6-9: Zobrazenie objemových zhustení v situácií zo zjednodušenou geometriou.	54
Obr.6-10: Znázornenie lokálneho zhustenia siete v pozdĺžnom reze komory.	54

Obr.6-11: STL sieť na hlave tepelného manekýna.....	56
Obr.7-1: Schéma vertikálneho umiestnenia anemometrov.	68
Obr.7-2: Schématické znázornenie meracích bodov v horizontálnych rovinách.	71

ZOZNAM TABULIEK

Tab.1.1: Metabolizmus človeka pri rôznej fyzickej činnosti (stupeň aktivity I až IV podľa ISO 8996) [2].....	11
Tab.1.2: Váhové podiely jednotlivých častí tela [2].	14
Tab.1.4: Závislosť A na rýchlosti prúdenia [3].....	18
Tab.1.5: Operatívne teploty (teplé ročné obdobie) – optimálna t_o (horný údaj) a prípustná $t_{o,A}$ (dolný údaj) [9].....	19
Tab.1.6: Operatívne teploty (chladné ročné obdobie) – optimálna t_o (horný údaj) a prípustná $t_{o,A}$ (dolný údaj) [9].	19
Tab.1.7: Ekvivalentná teplota v závislosti na teplote vzduchu a rýchlosti prúdenia [23].	21
Tab.5.1: Priemerné hodnoty teplôt v diskretných bodoch (1÷12).....	33
Tab.4.2: Priemerné hodnoty teplôt v diskretných bodoch (13÷24).....	34
Tab.4.3: Priemerné hodnoty teplôt v jednotlivých bodoch.....	35
Tab.4.4: Priemerné teploty u podlahy, okna a stropu.....	37
Tab.4.5a: Hodnoty rýchlostí na pravej strane manekýna.	39
Tab.4.5b: Hodnoty rýchlostí v stredovej rovine.	39
Tab.4.5c: Hodnoty rýchlostí po ľavej strane manekýna.	39
Tab.4.6: Hodnoty experimentálne nameraných rýchlostí v diskretných bodoch.	40
Tab.4.7: Tepelné toky jednotlivých častí tela.	42
Tab.6.1: Výpis hlavného nastavenia základnej siete.....	53
Tab.6.2: Základné nastavenie objemových zhustení, pre jednotlivé oblasti.....	55
Tab.7.1: Prenos tepla cez jednotlivé výustky a tepelný prírastok zjednodušených geometrií.	74

ZOZNAM GRAFOV

Graf.1.1: Tepelný profil pred manekýnom a pred výustkami.....	37
Graf 7.1: Vertikálny rýchlostný profil, 0,19 m od čelnej steny.....	58
Graf 7.2: Vertikálny rýchlostný profil v strede klimatickej komory, 1,69 m od čelnej steny.....	59
Graf 7.3: Vertikálny rýchlostný profil v strede klimatickej komory, 2,19 m od čelnej steny.....	59
Graf 7.4: Vertikálny rýchlostný profil, 0, 19 m od čelnej steny v stredovej rovine.	61
Graf 7.5: Vertikálny rýchlostný profil, 1,69 m od čelnej steny v stredovej rovine.	61
Graf 7.6: Vertikálny rýchlostný profil, 2,19 m od čelnej steny v stredovej rovine.	62
Graf 7.7: Znázornenie rýchlostných profilov pred čelnou stenou.	63
Graf 7.8: Znázornenie rýchlostného profilu pred zadnou stenou s výustkami.....	63
Graf 7.9: Horizontálny teplotný profil v meracích výškach 1 až 12.....	65
Graf 7.10: Horizontálny teplotný profil v meracích výškach 13 až 24.....	66
Graf 7.11: Horizontálny teplotný profil pred oknom.....	66
Graf 7.12: Vertikálny rýchlostný profil vzdialený 1,4 m od čelnej steny v stredovej osi manekýna.	68
Graf 7.13: Vertikálny rýchlostný profil vzdialený 1,69 m od čelnej steny v stredovej osi manekýna.....	69
Graf 7.14: Horizontálny teplotný profil vo výške 0,65 m od podlahy.	71
Graf 7.15: Horizontálny teplotný profil vo výške 0,9 m od podlahy.	73
Graf 7.16: Horizontálny teplotný profil vo výške 1,37 m od podlahy.	73

PRÍLOHY

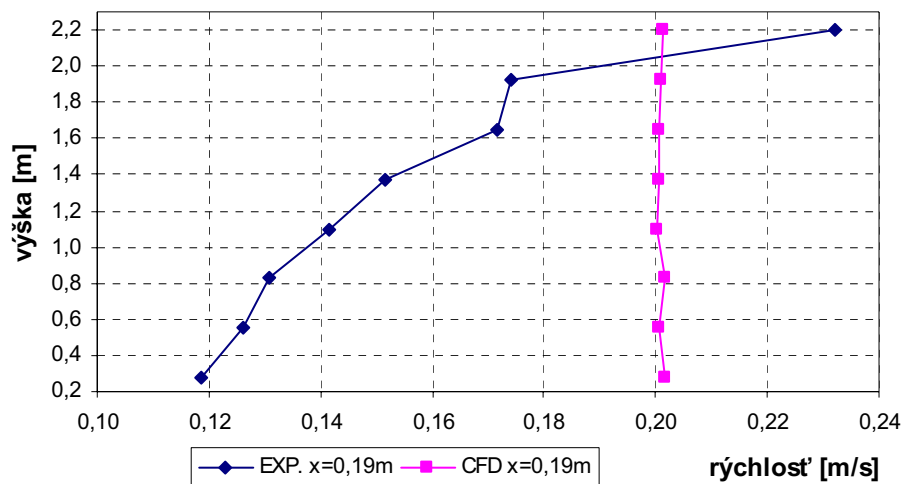
ZOZNAM PRÍLOH

Graf č.1: Vertikálny rýchlostný profil po pravej strane manekýna, 0,19 m od čelnej steny.....	90
Graf č.2: Vertikálny rýchlostný profil po ľavej strane manekýna, 0,19 m od čelnej steny.....	90
Graf č.3: Vertikálny rýchlostný profil po pravej strane manekýna, 1,69 m od čelnej steny.....	90
Graf č.4: Vertikálny rýchlostný profil po pravej strane manekýna, 2,19 m od čelnej steny.....	91
Graf č.5: Vertikálny rýchlostný profil po ľavej strane manekýna, 1,69 m od čelnej steny.....	91
Graf č.6: Vertikálny rýchlostný profil po ľavej strane manekýna, 2,19 m od čelnej steny.....	91
Graf č.7: Vertikálny rýchlostný profil vo vzdialenosti 0,05 m od pravého boku manekýna.....	92
Graf č.8: Vertikálny rýchlostný profil vo vzdialenosti 0,05 m od ľavého boku manekýna.....	92
Tab.č.1: Vypočítané hodnoty rýchlostí v 2 vertikálnych rovinách 0,19 m a 2,19 m.	94
Tab.č.2: Hodnoty rýchlostí pre jednotlivé vertikálne roviny a výšky.	94
Tab.č.3: Teploty v diskretných bodoch miestnosti.....	95
Tab.č.4: Rozdiely rýchlostí pre jednotlivé výpočtové modely.	95
Tab.č.5: Hodnoty teplôt pre horizontálnu rovinu vo výške 0,65 m nad podlahou.....	95
Tab.č.6: Hodnoty teplôt pre horizontálnu rovinu vo výške 0,9 m nad podlahou.	96
Tab.č.7: Hodnoty teplôt pre horizontálnu rovinu vo výške 1,37 m nad podlahou.....	96
Tab.č.8: Priemerná teplota jednotlivých častí tela.....	96
Tab.č.9: Veľkosť tepelného toku vyžiareného radiáciou a odvedeného konvekciou, pomer odvádzaného tepelného toku konvekciou ku radiačnému tepelnému toku.	97
Tab.č.10: Hodnoty experimentálne nameraných horizontálnych rýchlostí u jednotlivých častí tela.	97
Obr.č.1: Pozdĺžny rez dolných končatín vo výške 0,3 m nad podlahou pre variantu č.1.....	99
Obr.č.2: Pozdĺžny rez dolných končatín vo výške 0,3 m nad podlahou pre variantu č.1.....	99
Obr.č.3: Skalárne zobrazenie tepelného toku s vyhrievanej figuríny.....	100
Obr.č.4: Skalárne zobrazenie teplotných polí v reze tepelného manekýna 0,65 m od podlahy.....	100

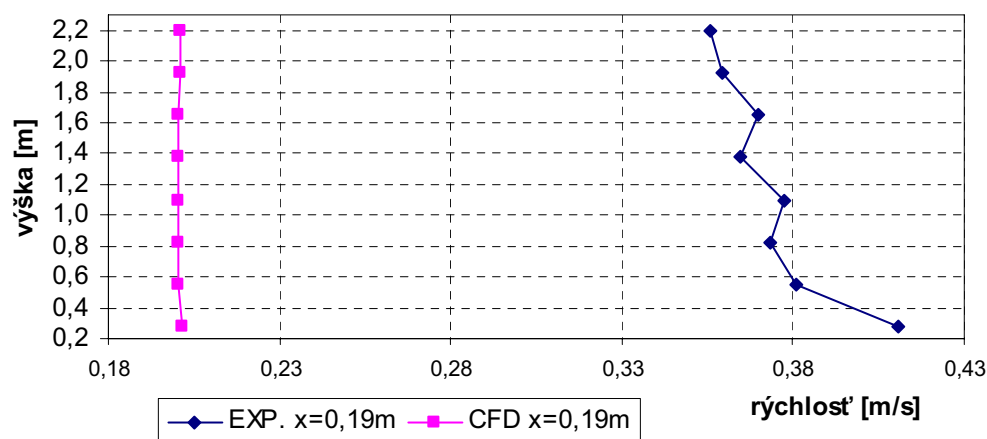
Obr.č.5: Skalárne zobrazenie teplotných polí v reze tepelného manekýna 0,9 m od podlahy.....	101
Obr.č.6: Znázornenie teplotného poľa na povrchu manekýna.	101
Obr.č. 7: Skalárne zobrazenie radiačného tepelného toku na povrchu manekýna.	102
Obr.č. 8: Skalárne zobrazenie konvektívneho tepelného toku na povrchu manekýna.....	102
Obr.č.9: Skalárne znázornenie rýchlostných polí v rovine vzdialenej 0,25 m od čelnej steny s výustkami, zo znázorneným meracím bodom.....	103

PRÍLOHA č. 1

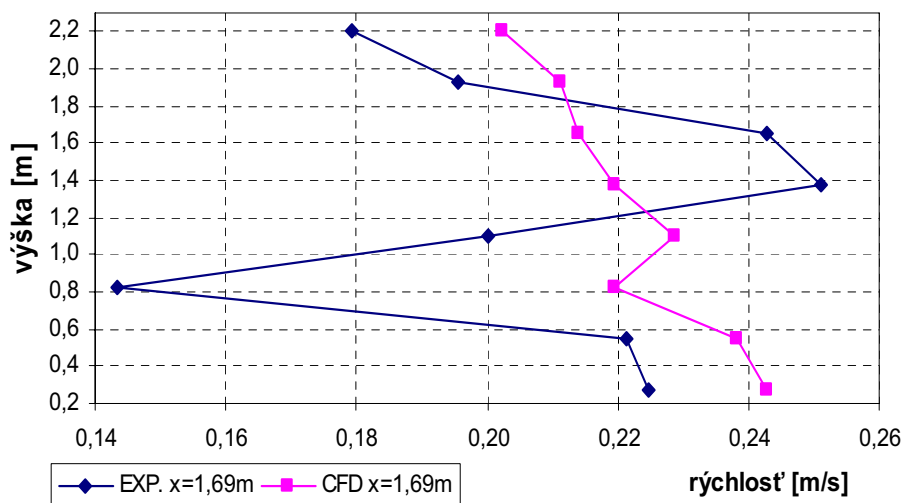
(GRAFY)



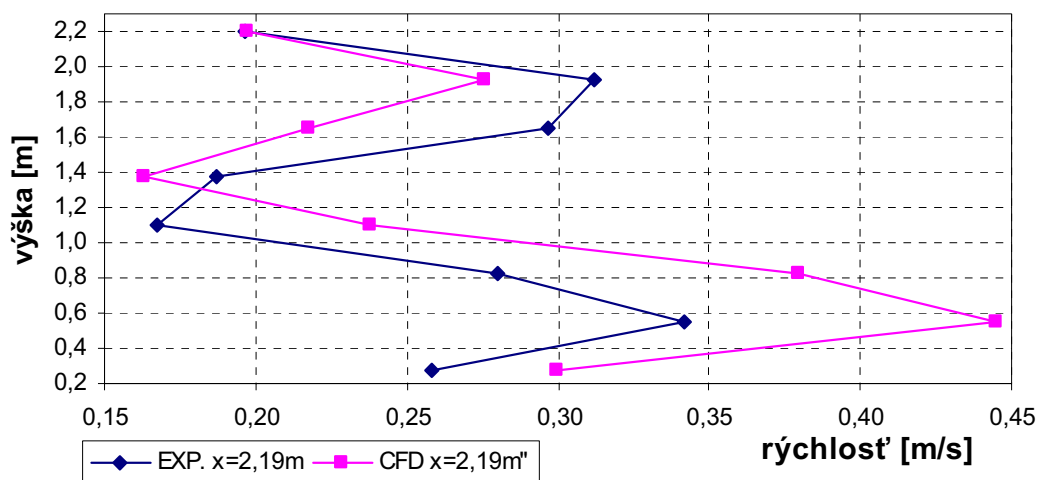
Graf č.1: Vertikálny rýchlostný profil po pravej strane manekýna, 0,19 m od čelnej steny.



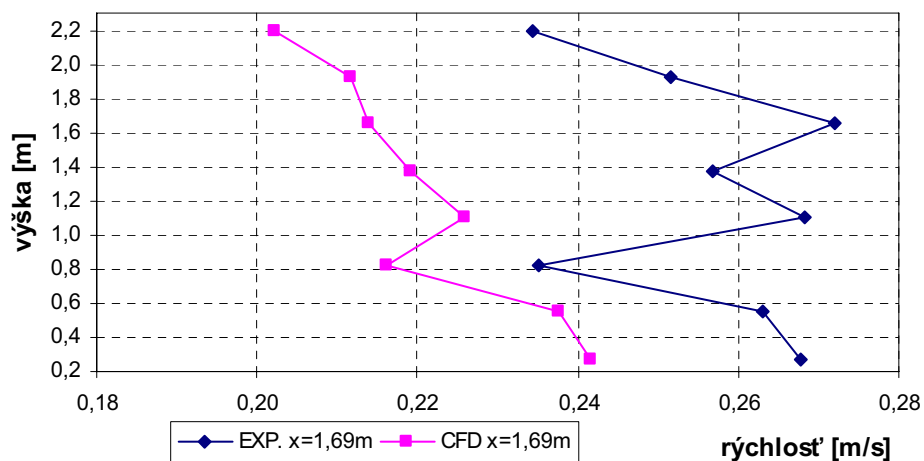
Graf č.2: Vertikálny rýchlostný profil po ľavej strane manekýna, 0,19 m od čelnej steny.



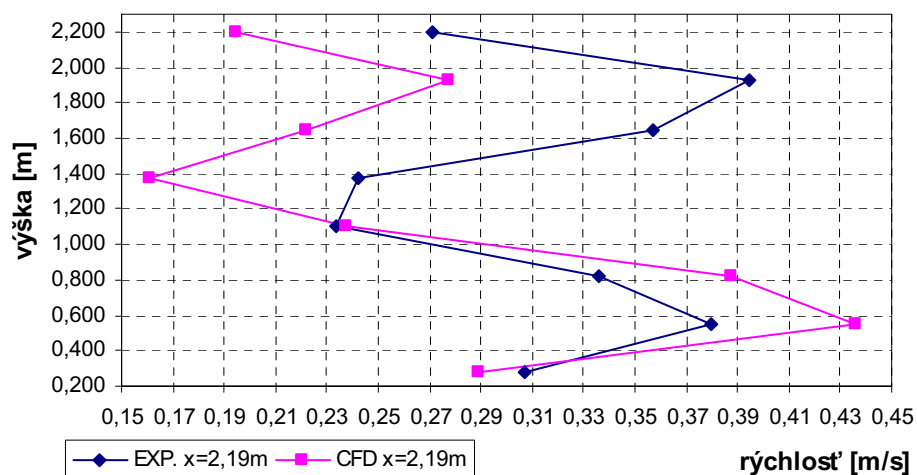
Graf č.3: Vertikálny rýchlostný profil po pravej strane manekýna, 1,69 m od čelnej steny.



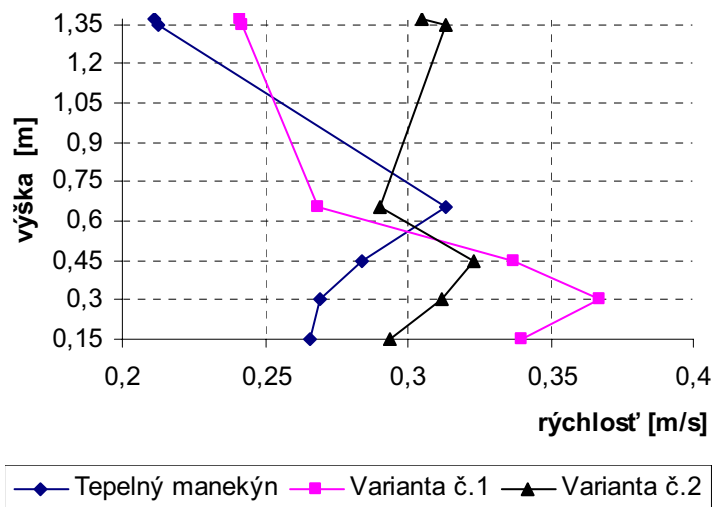
Graf č.4: Vertikálny rýchlostný profil po pravej strane manekýna, 2,19 m od čelnej steny.



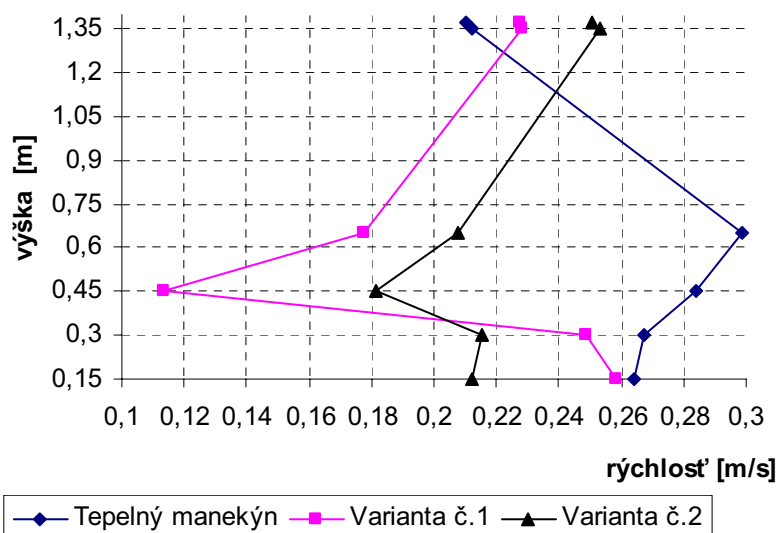
Graf č.5: Vertikálny rýchlostný profil po ľavej strane manekýna, 1,69 m od čelnej steny.



Graf č.6: Vertikálny rýchlostný profil po ľavej strane manekýna, 2,19 m od čelnej steny.



Graf č.7: Vertikálny rychlostný profil vo vzdialenosti 0,05 m od pravého boku manekýna.



Graf č.8: Vertikálny rychlostný profil vo vzdialenosti 0,05 m od ľavého boku manekýna.

PRÍLOHA č.2

(TABULKY)

Tab.č.1: Vypočítané hodnoty rýchlostí v 2 vertikálnych rovinách 0,19 m a 2,19 m.

Meracie body	x=0,19[m]	Experiment	CFD	CFD
			Lok.tepl.toky	Konšt.toky
	y(m)	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)
1	0,275	0,292	0,1972	0,1972
2	0,55	0,269	0,1970	0,1971
3	0,875	0,254	0,1972	0,1972
4	1,1	0,243	0,1985	0,1986
5	1,3	0,278	0,1996	0,1996
Meracie body	x=2,19[m]	Experiment	Lok.tepl.toky	Konšt.toky
			v (m/s)	v (m/s)
	y(m)	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)
6	0,275	0,186	0,1243	0,1268
7	0,55	0,228	0,6725	0,6728
8	0,875	0,720	0,1785	0,1792
9	1,1	0,982	0,1713	0,1699
10	1,3	0,469	0,0645	0,0635

Tab.č.2: Hodnoty rýchlostí pre jednotlivé vertikálne roviny a výšky.

z=0,275	CFD	varianta	varianta	z =0,6	CFD	varianta	varianta
x=1,15	manekýn	č.1	č.2	x =1,4	manekýn	č.1	č.2
y [m]	m/s	m/s	m/s	y [m]	m/s	m/s	m/s
0,15	0,2656	0,3401	0,2937	0,15	0,2433	0,0040	0,1914
0,3	0,2693	0,3671	0,3119	0,3	0,2480	0,0400	0,2190
0,45	0,2836	0,3369	0,3229	0,45	0,2230	0,0343	0,1593
0,9	0,3132	0,2688	0,2899	0,9	0,2058	0,0334	0,0604
1,35	0,2126	0,2419	0,3133	1,35	0,1826	0,1206	0,1346
1,37	0,2114	0,2413	0,3046	1,37	0,1790	0,1377	0,1685
z =0,6	CFD	varianta	varianta	z = 0,895	CFD	varianta	varianta
x =1,69	manekýn	č.1	č.2	x = 1,15	manekýn	č.1	č.2
y [m]	m/s	m/s	m/s	y (m)	m/s	m/s	m/s
0,15	0,2271	0,1154	0,1266	0,15	0,2638	0,2583	0,2124
0,3	0,2360	0,1112	0,1841	0,3	0,2673	0,2487	0,2154
0,45	0,2381	0,0698	0,1951	0,45	0,2837	0,1132	0,1811
0,9	0,2388	0,0287	0,0367	0,9	0,2987	0,1774	0,2079
1,35	0,2003	0,1376	0,1844	1,35	0,2121	0,2283	0,2529
1,37	0,1964	0,1468	0,1947	1,37	0,2103	0,2276	0,2508

Tab.č.3: Teploty v diskretných bodoch miestnosti.

Pozícia	EXP.	CFD lok.toky	CFD konšt.tok
	t [°C]	t [°C]	t [°C]
Strop	20,5	20,00	20,00
Podlaha	20,7	20,04	20,00
Podlaha 2	24,3	20,00	20,00
Podlaha 3	19,8	20,00	20,00
Stred stropu	20,7	20,00	20,00
Okno 1	20,9	20,09	20,09
Okno 2	20,8	20,21	20,26
Spodná výustka	20,2	20,56	20,66
Horná výustka	20,6	20,83	20,84

Tab.č.4: Rozdiely rychlosti pre jednotlivé výpočtové modely.

	tepelný	varianta	Δ		tepelný	varianta	Δ
x = 1,4	manekýn	č.1	m/s	x = 1,69	manekýn	č.1	m/s
y [m]	m/s	m/s		y [m]	m/s	m/s	
0,15	0,2433	0,004	0,24	0,15	0,227	0,115	0,11
0,3	0,2480	0,040	0,21	0,3	0,236	0,111	0,12
0,45	0,2230	0,034	0,19	0,45	0,238	0,070	0,17
0,9	0,2058	0,033	0,17	0,9	0,239	0,029	0,21
1,35	0,1826	0,121	0,06	1,35	0,200	0,138	0,06
1,37	0,1790	0,138	0,04	1,37	0,196	0,147	0,05
	tepelný	varianta	Δ		tepelný	varianta	Δ
x = 1,4	manekýn	č.2	m/s	x = 1,69	manekýn	č.2	m/s
y [m]	m/s	m/s		y [m]	m/s	m/s	
0,15	0,2433	0,191	0,05	0,15	0,227	0,127	0,10
0,3	0,2480	0,219	0,03	0,3	0,236	0,184	0,05
0,45	0,2230	0,159	0,06	0,45	0,238	0,195	0,04
0,9	0,2058	0,060	0,15	0,9	0,239	0,037	0,20
1,35	0,1826	0,135	0,05	1,35	0,200	0,184	0,02
1,37	0,1790	0,169	0,01	1,37	0,196	0,195	0,00

Tab.č.5: Hodnoty teplôt pre horizontálnu rovinu vo výške 0,65 m nad podlahou.

z = 0,6 (m)	CFD	varianta č.1	varianta č.2
y = 0,65 m	°C	°C	°C
x (m)			
0,75	20,0023	20,5872	20,3177
0,85	20,0083	20,5061	20,2726
0,95	20,0461	20,3429	20,2214
1	20,2117	20,2317	20,1354
1,3	24,1878	21,2192	21,2793
1,35	22,3487	21,0359	21,0072
1,4	21,8510	20,9566	20,9335
1,45	21,4266	20,8860	20,8782
1,69	20,4941	20,6897	20,6810

Tab.č.6: Hodnoty teplôt pre horizontálnu rovinu vo výške 0,9 m nad podlahou.

z = 0,8 (m)	CFD	varianta č.1	varianta č.2
y = 0,9 (m)	°C	°C	°C
x (m)			
0,75	20,0002	20,2671	20,0804
0,85	20,0006	20,2131	20,0328
0,95	20,0212	20,1360	20,0141
1	20,2568	20,0885	20,0080
1,3	21,7429	21,2519	21,1533
1,35	21,5718	21,0074	20,9708
1,4	21,4517	20,8956	20,8945
1,45	21,3447	20,8149	20,8157
1,69	20,7696	20,6041	20,5605

Tab.č.7: Hodnoty teplôt pre horizontálnu rovinu vo výške 1,37 m nad podlahou.

z = 0,8 (m)	CFD	varianta č.1	varianta č.2
y = 1,37 (m)	°C	°C	°C
x (m)			
0,75	20,0001	20,0883	20,0120
0,85	20,0002	20,0696	20,0044
0,95	20,0006	20,0465	20,0024
1	20,0023	20,0335	20,0021
1,1	20,1129	20,2835	20,6086
1,3	21,9224	20,7093	21,2380
1,35	21,8241	20,4884	20,9208
1,4	21,7651	20,4165	20,7310
1,45	21,6716	20,3676	20,5865
1,69	21,2672	20,2599	20,2720

Tab.č.8: Priemerná teplota jednotlivých častí tela.

Časť tela	Teplota
	°C
Chrbát	33
Hlava	32
Ľavé chodidlo	30
Ľavé predlaktie	29
Ľavá ruka	30
Ľavé stehno	32
Ľavé rameno	31
Ľavé predkolenie	30
Pánva	33
Pravé chodidlo	30
Pravé predlaktie	29
Pravá ruka	29
Pravé stehno	32
Pravé rameno	31
Pravé predkolenie	30
Vrch hlavy	32

Tab.č.9: Veľkosť tepelného toku vyžiareného radiáciou a odvedeného konvekciou, pomer odvádzaného tepelného toku konvekciou ku radiačnému tepelnému toku.

Časť tela	Radiácia W/m ²	Kondukcia W/m ²	Pomer
Chrbát	-9,17	-19	2,1
Hlava	-7,3	-22	3
Ľavé chodidlo	-12	-43	3,6
Ľavé predlaktie	12	-52	4,3
Ľavá ruka	23	-41	1,8
Ľavé stehno	-8,4	-31	3,7
Ľavé rameno	12	-20	1,7
Ľavé predkolenie	-22	-40	1,8
Pánva	-25	-24	1
Pravé chodidlo	-13	-42	3,2
Pravé predlaktie	11	-51	4,6
Pravá ruka	18	-52	2,9
Pravé stehno	-8,7	-28	3,2
Pravé rameno	9,7	-19	2
Pravé predkolenie	-24	-40	1,7
Vrch hlavy	-33	-20	0,6

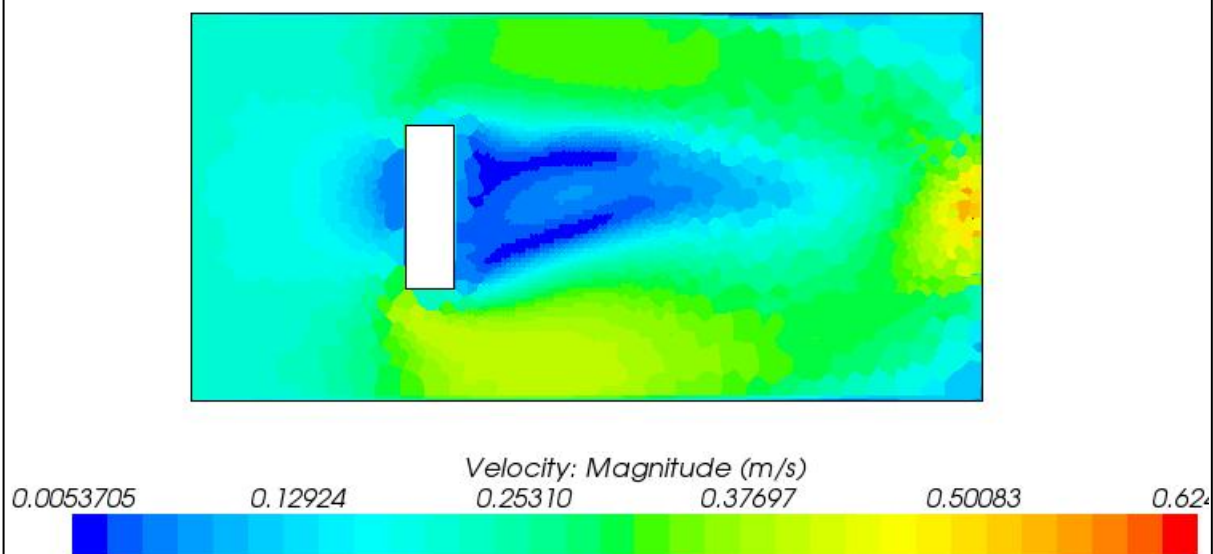
Poznámka: Znamienko mínus pred hodnotou tepelných tokov znamená smer orientácie plochy. Kladný smer je v smere normály plochy do telesa. Pomer tepelných tokov je v udávaný bez smeru orientácie plôch.

Tab.č.10: Hodnoty experimentálne nameraných horizontálnych rýchlostí u jednotlivých častí tela.

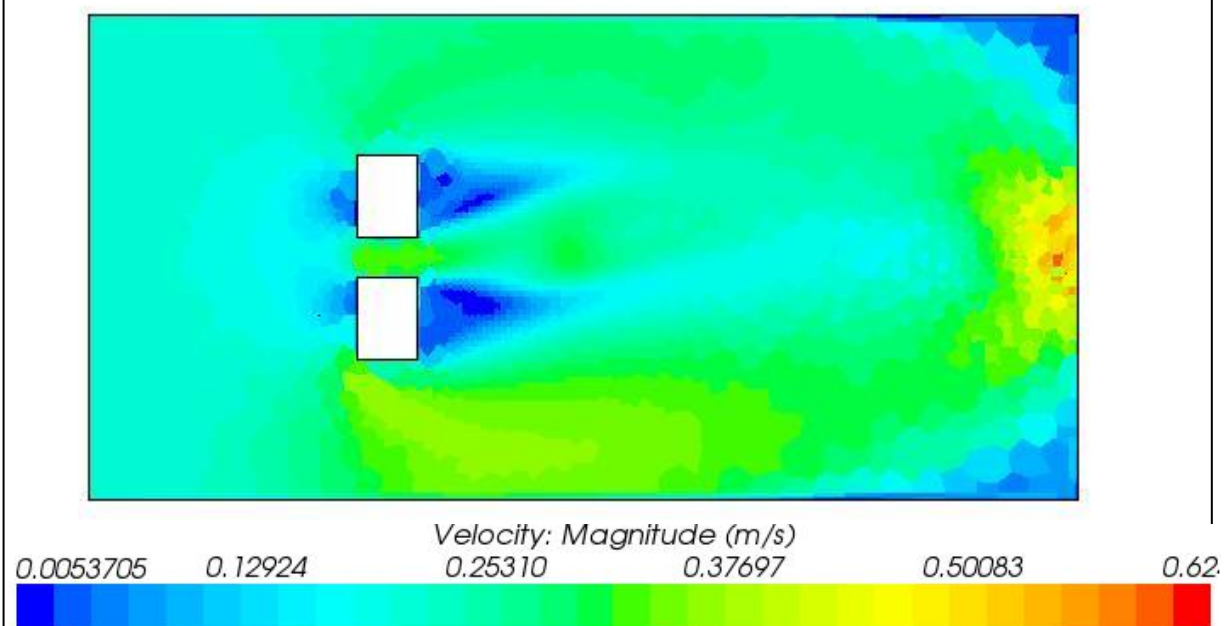
Stred tela		V úrovni úst		Nad hlavou	
x [m]	Vel. (m/s)	x [m]	Vel. (m/s)	x [m]	Vel. (m/s)
0,002	0,0605	0,002	0,06	0	-0,0252
0,004	0,0777	0,004	0,0499	0,03	-0,0251
0,008	0,0622	0,008	0,0661	0,06	-0,0175
0,012	0,0868	0,012	0,0493	0,09	-0,0085
0,022	0,092	0,022	0,0682	0,12	-0,0060
0,032	0,0901	0,026	0,0585	0,15	0,0143
0,042	0,0812	0,036	0,0632	0,18	0,0659
0,052	0,0859	0,046	0,0681	0,21	0,1466
0,072	0,0717	0,056	0,0709	0,24	0,1448
0,092	0,0651	0,076	0,0703	0,27	0,1044
0,112	0,0561	0,096	0,0614		
0,132	0,0437	0,116	0,0652		
0,152	0,0391	0,136	0,0625		

PRÍLOHA č.3

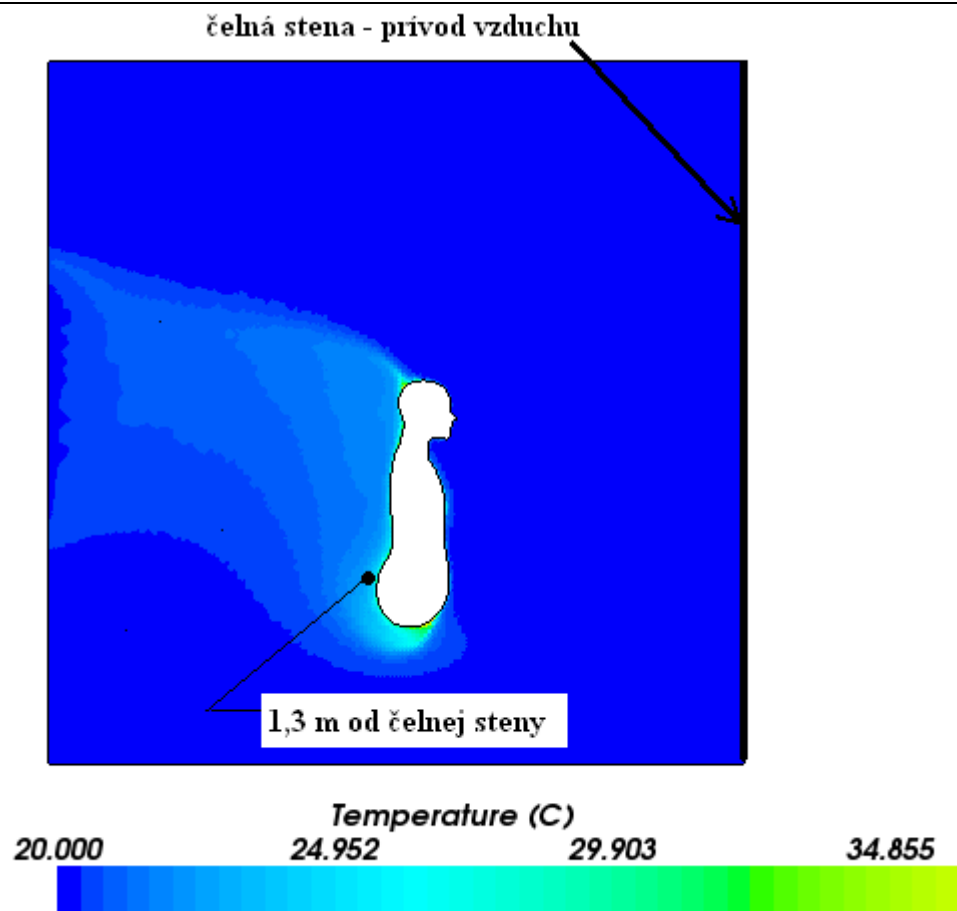
(OBRÁZKY)



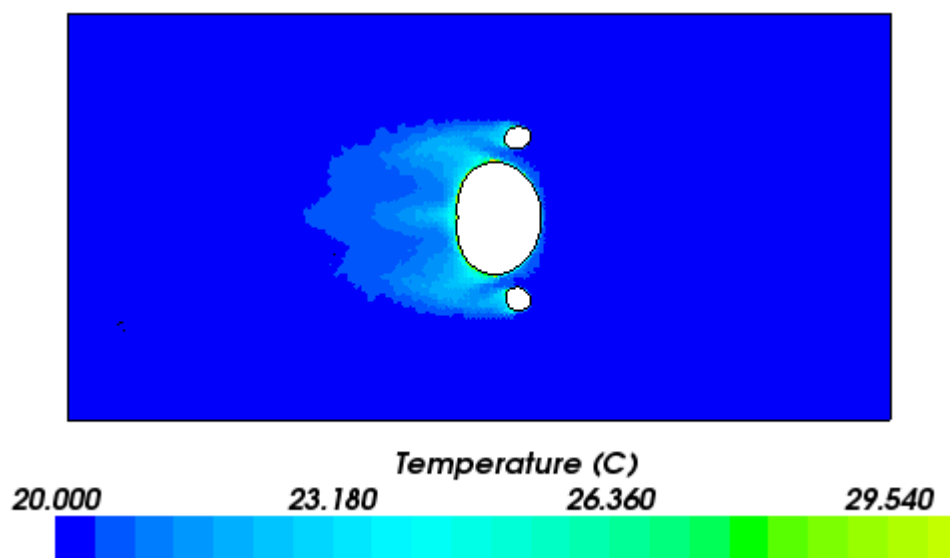
Obr.č.1: Pozdĺžny rez dolných končatín vo výške 0,3 m nad podlahou pre variantu č.1.



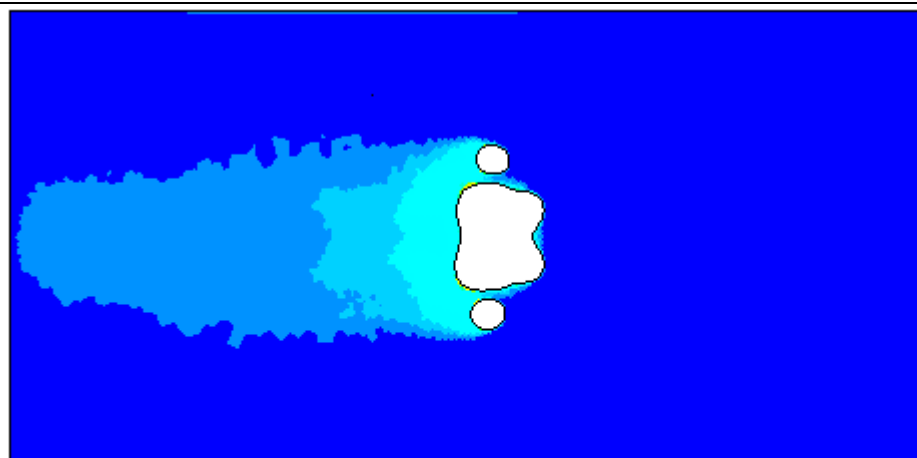
Obr.č.2: Pozdĺžny rez dolných končatín vo výške 0,3 m nad podlahou pre variantu č.1.



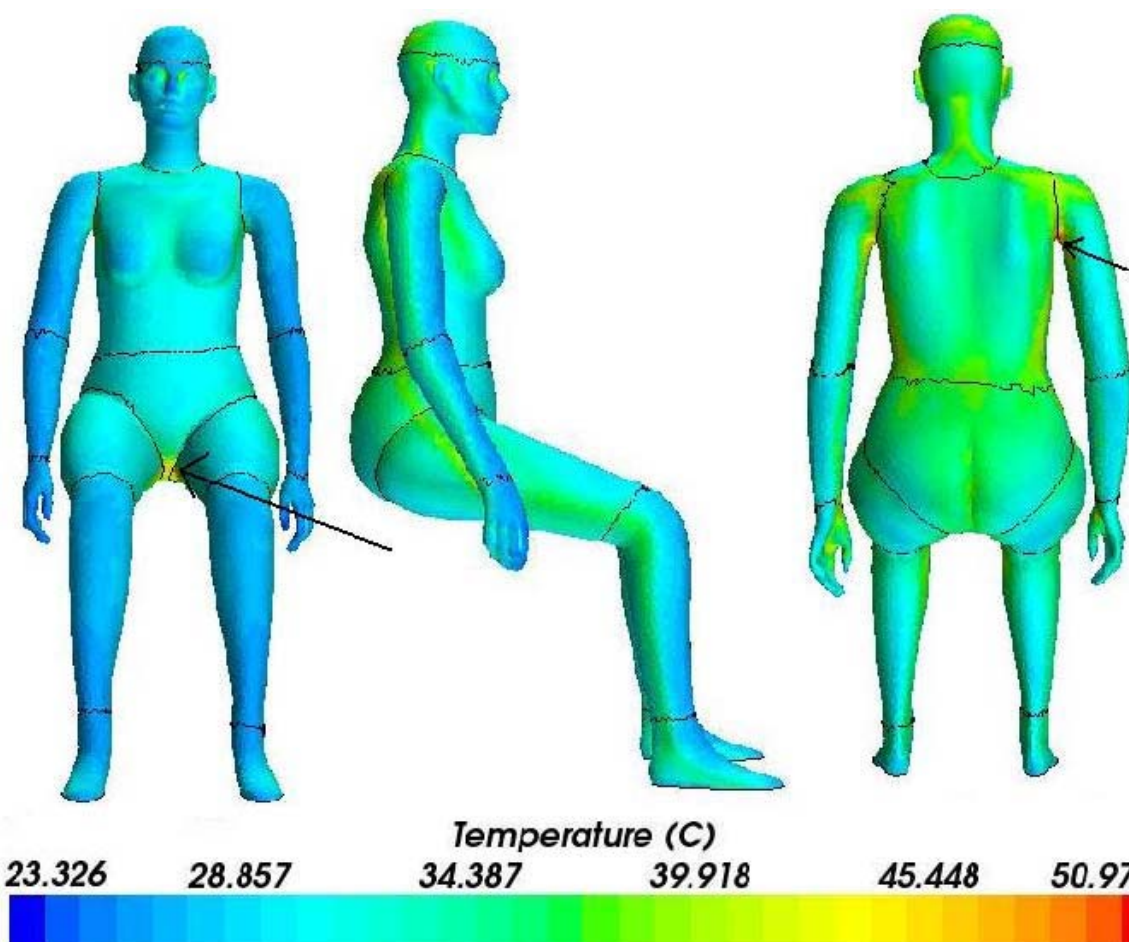
Obr.č.3: Skalárne zobrazenie tepelného toku s vyhrievanej figuríny.



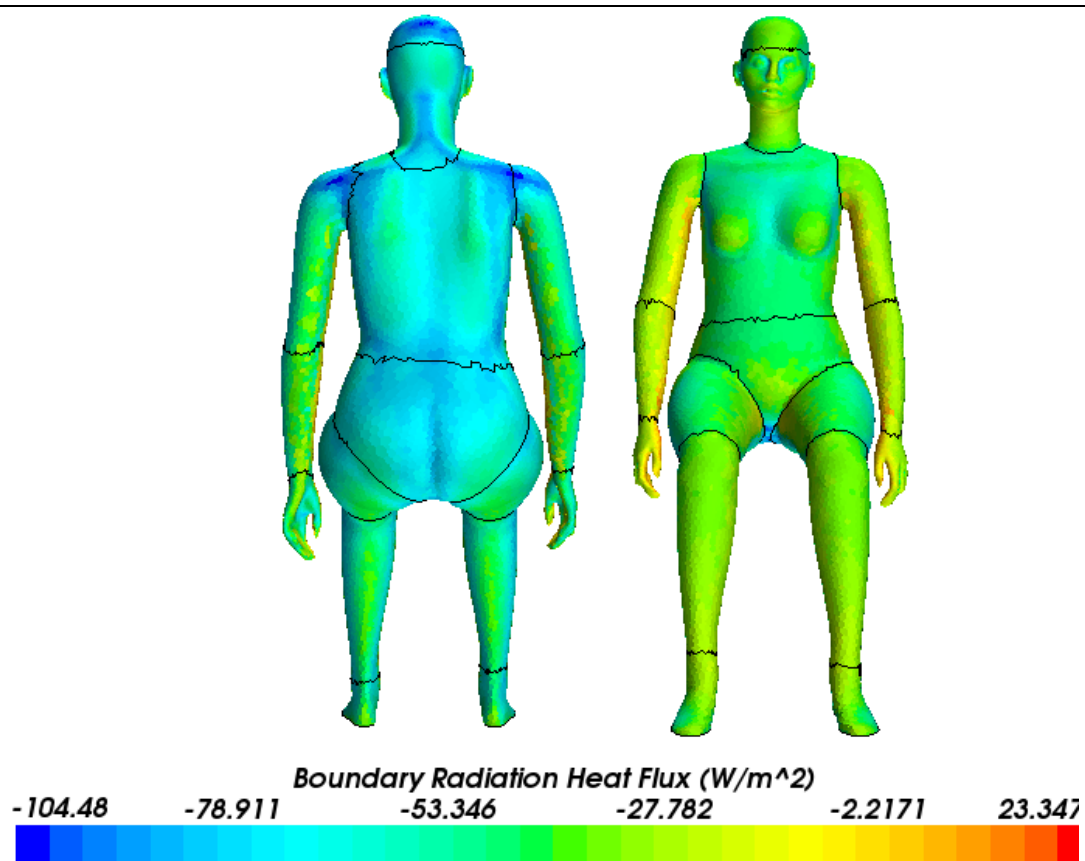
Obr.č.4: Skalárne zobrazenie teplotných polí v reze tepelného manekýna 0,65 m od podlahy.



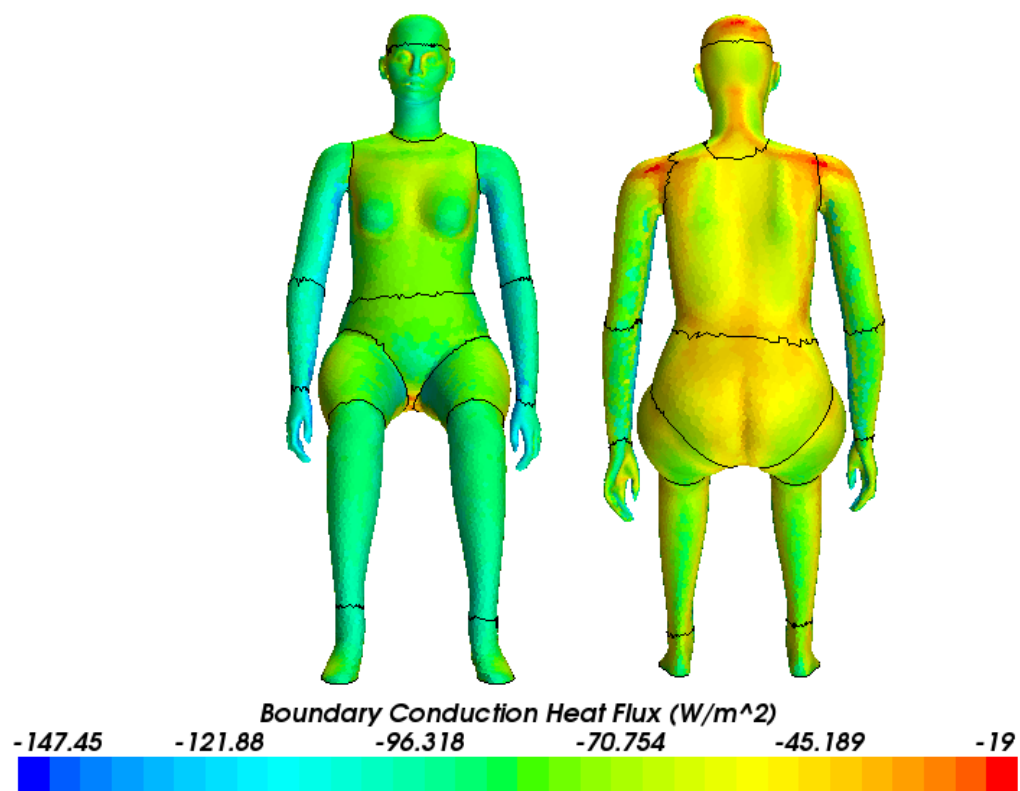
Obr.č.5: Skalárne zobrazenie teplotných polí v reze tepelného manekýna 0,9 m od podlahy.



Obr.č.6: Znáznornenie teplotného poľa na povrchu manekýna.



Obr.č. 7: Skalárne zobrazenie radiačného tepelného toku na povrchu manekýna.



Obr.č. 8: Skalárne zobrazenie konvektívneho tepelného toku na povrchu manekýna.

